

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Agronómica

Análisis de riegos de incendios en cosechadoras de
cereales en Aragón

*Analysis of fire risks associated with cereal
harvesters in Aragón*

Autor

Jesús P. Val Aguasca

Directores

Francisco Javier García Ramos
Pablo Martín Ramos

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
2019

El presente Trabajo Fin de Máster se ha realizado dentro del marco del **Grupo de Cooperación ANÁLISIS DE RIESGOS DE INCENDIOS EN COSECHADORAS DE CEREALES**, correspondiente al Programa de Desarrollo Rural para Aragón 2014-2018, para el año 2017, establecido en la Orden DRS/190/2017 de 16 de febrero.

Grupo de cooperación integrado por:

- ASAJA-Huesca. Asociación Agraria de Jóvenes Agricultores
- AGPME-ITAGA. Asociación General De Productores de Maíz en España – Instituto Agrícola y Ganadero
- EPS. Escuela Politécnica Superior – Universidad de Zaragoza
- AGRACON. Asociación Aragonesa de Agricultura de Conservación
- ANSEMAT. Asociación Nacional de Maquinaria Agropecuaria, Forestal y de Espacios Verdes
- Sociedad Cooperativa del Campo Santa Leticia
- Laura Alcácer Fontana

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento:

Al Servicio General de Apoyo a la Investigación – SAI de la Universidad de Zaragoza, responsables de la fabricación *ad hoc* del equipamiento para los ensayos de auto-ignición.

A Talleres COGASAL, por su inestimable ayuda en la instalación de los sensores en las máquinas durante la primera campaña.

A los Profesores Mariano Vidal Cortes y Antonio Boné Garasa por su ayuda en la instalación de las sondas en las cosechadoras y en la instalación del ensayo de auto-ignición.

A los Profesores David Badia Villas y Clara Martí Dalmau por facilitar el equipamiento para los ensayos de granulometría.

A María Videgaín Marco por su ayuda con los análisis inmediatos y su apoyo a lo largo de estos dos últimos años.

A los propietarios y operadores de las cosechadoras, por su buena disposición y darnos todas las facilidades a la hora de hacer los ensayos de monitorización in situ.

A mis compañeros, con los que he compartido la vida diaria, las clases y los apuntes.

A mis amigos, que siempre han estado ahí para todo lo que he necesitado.

A mi familia y a Julia, que han soportado el cansancio, los días malos, los nervios, los exámenes, los disgustos y han celebrado cada paso adelante durante estos años.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Los incendios forestales y la maquinaria agrícola (cosechadoras de cereales).....	1
1.2. Características técnicas de las cosechadoras de cereales	5
1.3. Condicionantes de fabricación de las cosechadoras relacionados con la seguridad frente a incendios.....	8
1.4. Estado del parque de cosechadoras en Aragón y España	9
1.5. Distribución geográfica de los incendios originados por maquinaria agrícola en Aragón	12
2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	15
2.1. Determinación de puntos críticos de riesgo en cosechadoras.....	15
2.1.1. Encuesta.....	15
2.1.2. Estudio del parque de cosechadoras	15
2.2. Estudio del material comburente	16
2.2.1. Recogida de muestra	16
2.2.2. Análisis inmediato	18
2.2.3. Análisis térmico.....	21
2.2.4. Ensayo de ignición	21
2.3. Monitorización de cosechadoras en campo	25
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1. Resultado encuestas	33
3.1.1. Relaciones entre variables.....	33
3.1.2. Relación entre variables e incendio	34
3.1.3. Determinación de las cosechadoras en uso con mayor riesgo de incendio	35
3.1.4. Determinación de las zonas de origen de incendios.....	36
3.2. Estudio del material comburente	38
3.2.1. Granulometría.....	38
3.2.2. Análisis inmediato	39
3.2.3. Análisis térmico.....	40
3.2.4. Ensayo de ignición	41
3.3. Resultados ensayos de campo con maquinaria.....	44
3.3.1. Monitoreo in situ de las cosechadoras.....	44
3.3.2. Barra de corte.....	48
4. CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXO.....	53

Índice de figuras

Figura 1.	Partes de una cosechadora. Fuente: Claas.	6
Figura 2.	Sistema de ventilación 'Dynamic Cooling' (izq.) y detalle de un rotor de trilla (dcha.). Fuente: Claas y Case IH.	8
Figura 3.	Censo real de cosechadoras en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).	10
Figura 4.	Censo real de cosechadoras por marcas en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).	11
Figura 5.	Porcentaje de cosechadoras en función de su potencia en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).	11
Figura 6.	Distribución de incendios por comarcas y año. (Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón).	13
Figura 7.	Distribución de incendios por tierras de secano/regadío. (Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón).	14
Figura 8.	Acumulación de residuo en distintas partes de la máquina.	16
Figura 9.	Estufa donde se realizó el secado de las muestras (izq.) y muestra de residuo secado (dcha.).	17
Figura 10.	Torre de tamices modelo BA200N (CISA, Barcelona, España) con los 5 tamices utilizados.	17
Figura 11.	Muestras de los 6 tamaños tamizados. a) 4mm; b) 2mm; c) 1mm; d) 500µm; e) 250µm; f) <250µm.	18
Figura 12.	Muestra en el crisol tras el ensayo de material volátil (izq.) y cenizas (dcha.).	20
Figura 13.	Esquema de la placa caliente (izq.) y distribución típica de la temperatura superficial (dcha.).	22
Figura 14.	Curvas típicas de temperatura/tiempo de la inflamación de la capa de polvo sobre una superficie caliente.	23
Figura 15.	Placa calefactora y registrador de temperatura	23
Figura 16.	Termopar tipo K utilizado para la superficie caliente (izq.) y para la capa de polvo (dcha.).	24
Figura 17.	Anillos utilizados durante los ensayos de ignición.	24
Figura 18.	Equipo completo utilizado en los ensayos de ignición.	25
Figura 19.	Izquierda: Indicador/datalogger portátil. Derecha: termopar tipo K de aislamiento mineral.	26
Figura 20.	Software Hoboware Pro y Puerto USB óptico. Sonda de temperatura y humedad (Hobo Pro v2).	27
Figura 21.	Detalle termopar tipo K situado en el colector de escape (izqda.). Colocación sonda HOBO en el exterior de la máquina (dcha.).	30

Figura 22.	Detalle de la sonda de temperatura instalada en la barra de corte.....	30
Figura 23.	Cámara de infrarrojos Fluke Ti 200.	31
Figura 24.	Relación entre las hectáreas anuales con la potencia, la antigüedad y las hectáreas acumuladas. Se muestran los valores medios \pm las desviaciones estándar.	34
Figura 25.	Probabilidad de incendio en función de las hectáreas acumuladas.....	34
Figura 26.	Relación entre las hectáreas acumuladas con la potencia, la antigüedad y las hectáreas anuales. Se muestran los valores medios \pm las desviaciones estándar...	35
Figura 27.	Porcentaje de cosechadoras en uso en función de su potencia en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).	36
Figura 28.	Zonas de origen de incendios a través de los datos obtenidos de la encuesta.	37
Figura 29.	Comparación de la caracterización granulométrica en la zona del picador.....	38
Figura 30.	Diagrama ternario del análisis inmediato. Muestra de cebada (Rojo) y muestra de trigo (Verde).....	39
Figura 31.	Curvas de descomposición térmica de la paja de trigo (<i>arriba</i>) y cebada (<i>abajo</i>) en atmósfera de nitrógeno (<i>izquierda</i>) u oxidativa (<i>derecha</i>). En el eje izquierdo se representa la escala para la curva de DSC (exo up); en el primer eje derecho, la curva TG; y en el segundo eje derecha, la curva DTG.	40
Figura 32.	Representación de la temperatura de ignición en función del tamaño de muestra para tres espesores de muestra (superior) y del espesor de la muestra para tres tamaños de partícula (inferior).....	43
Figura 33.	Incandescencia originada durante la realización del ensayo.....	44
Figura 34.	Comparación entre una muestra que ha sufrido combustión total (a) con otra parcial (b).....	44
Figura 35.	Evolución de la temperatura en el colector de escape (azul) vs temperatura de ignición de la paja (rojo). Izquierda: Máquina 1, Derecha: Máquina 4. No se muestran los periodos en los que las máquinas no funcionaban (por ejemplo, noches).	46
Figura 36.	Histograma de periodos de tiempo en los que se alcanzaron temperaturas superiores a 250°C en el colector de escape. Izquierda: máquina #1; Derecha: máquina #4.	46
Figura 37.	Resultados del análisis univariado para las temperaturas en función del sistema de tratamiento de los gases de escape. Las barras de error indican un intervalo de confianza del 95%.	47
Figura 38.	<i>Izquierda:</i> Evolución de la temperatura en la barra de corte para una cuchilla en buenas condiciones (azul) y para una cuchilla sometida a fricción (rojo). La temperatura ambiente se muestra en negro. <i>Derecha:</i> Imagen térmica de la cuchilla sometida a fricción.....	48

Índice de tablas

Tabla 1.	Características de las cosechadoras monitorizadas en la campaña 2018 y 2019	29
Tabla 2.	Localización de las sondas de temperatura en las 9 cosechadoras	29
Tabla 3.	Resultados obtenidos en la encuesta.....	33
Tabla 4.	Estimación del número de cosechadoras en España y Aragón	35
Tabla 5.	Cosechadoras con mayor riesgo de incendio, a partir de los datos obtenidos en la encuesta.....	36
Tabla 6.	Comparación de las principales zonas de origen de incendios en cosechadoras.....	37
Tabla 7.	Caracterización granulométrica del residuo de las distintas zonas de la máquina. 38	
Tabla 8.	Análisis inmediato del residuo. b.s.: base seca.....	39
Tabla 9.	Resultados del análisis térmico del residuo.....	41
Tabla 10.	Resultados de las pruebas de autoinflamación de placas calientes de capas de residuo de trigo según UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.....	42
Tabla 11.	Temperaturas registradas durante las campañas de 2018 y 2019 en las nueve cosechadoras monitorizadas en condiciones de campo. Las temperaturas ambientes máximas y la humedad relativa asociada (RH) también se muestran a efectos de comparación.....	45
Tabla 12.	Test de efectos entre sujetos (resultados del análisis univariado) para las temperaturas en función del sistema de tratamiento de gases de escape.	47
Tabla 13.	Resultados de la prueba HSD de Tukey para las temperaturas en función del sistema de tratamiento de gases de escape.....	47

Resumen

Las cosechadoras constituyen una causa importante de incendios en todo el mundo. El objetivo de este trabajo ha sido investigar los puntos críticos asociados al riesgo de incendio en este tipo de máquinas, identificados a través de una encuesta distribuida a propietarios de cosechadoras en Aragón (España). Se recopiló información sobre las características técnicas de las máquinas y, en su caso, sobre las características de los incendios generados (cultivo, uso del picador de paja, zona en el que se originó el incendio, etc.). Sobre la base de los datos de la encuesta, se analizaron las relaciones entre las características de la máquina y la ignición de un incendio, y se investigaron los puntos de la cosechadora en la que se originó el fuego. Sólo se encontró una relación estadísticamente significativa del riesgo de incendio con el número de hectáreas cosechadas, de manera que el riesgo sería especialmente alto para las máquinas con más de 6000 ha acumuladas. El 32% de los incendios se originaron en la zona del motor, en comparación con el 31% en la barra de corte y el 18% en los rodamientos y correas. El estudio se completó con mediciones de temperatura in situ realizadas en nueve máquinas en 2018 y 2019, en las que se registraron temperaturas superiores a 250 °C en el colector de escape y en la barra de corte. Estas temperaturas superaron los umbrales de ignición obtenidos en los estudios de inflamabilidad realizados en laboratorio para los residuos de trigo recogidos de las cosechadoras.

Palabras clave: maquinaria agrícola; barra de corte; EN ISO/IEC 80079-20-2; inflamabilidad; temperatura de ignición; picador, paja; sensor de temperatura

Abstract

Combine harvesters are an important cause of fires worldwide. The purpose of this work has been to investigate the critical points associated with the risk of fire in this type of machines, identified through a survey distributed to combine owners in Aragón (Spain). Information was collected on the technical characteristics of the machines and, when appropriate, on the characteristics of the generated fires (crop, use of straw chopper, point in which the fire was originated, etc.). Based on the survey data, relationships between the characteristics of the machine and the ignition of a fire were analyzed, and the points of the harvester in which the fire originated were investigated. A statistically significant relationship of fire risk was only found with the number of hectares harvested, in such a way that the risk would be especially high for machines with more than 6000 accumulated ha. 32% of the fires were originated in the engine zone, compared with 31% in the cutting bar and 18% in the bearings and belts. The study was completed with on-site temperature measurements carried out on nine machines in 2018 and 2019, in which temperatures above 250 °C were recorded in the exhaust manifold and in the cutting bar. These temperatures exceeded the ignition thresholds obtained in laboratory the flammability studies conducted for wheat residues collected from the harvesters.

Keywords: agricultural machinery; cutting bar; EN ISO/IEC 80079-20-2; flammability; ignition temperature; straw chopper; temperature sensor

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Los incendios forestales y la maquinaria agrícola (cosechadoras de cereales)

Los incendios constituyen una amenaza grave, tanto por la destrucción de patrimonio medioambiental como de cultivos forestales, bienes materiales y vidas humanas. Las pérdidas agrícolas por incendios no se limitan, a corto plazo, a la destrucción de las cosechas, sino que, a medio plazo, se incrementan con pérdidas de la capacidad productiva estimadas en un 35-45% de la producción (Bragachini et al., 2013). Las consecuencias de los incendios forestales afectan a la vegetación (muerte de especies vegetales y reducción de biodiversidad), a la fauna (muerte de animales y desaparición de organismos de gran importancia para el ecosistema), al suelo (mayor erosión y pérdida de fertilidad), a la economía y a los seres humanos (grandes costes, pérdidas de inversiones y vidas humanas).

Las causas que originan los incendios son de distinta índole. De forma general, los incendios forestales se clasifican en cinco grandes grupos: negligencia y accidente, intencionados, naturales (rayo), desconocidos y reproducción de incendio. Dentro del grupo de negligencia y accidente, se engloban las quemas agrícolas, motores y máquinas, líneas eléctricas, hogueras, etc. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) publica boletines informativos mensuales, exceptuando en la época de verano (1 de junio - 15 de octubre) en la que tienen periodicidad semanal, en los que se incluye información sobre el número de incendios, superficies afectadas (arbolada/no arbolada) y la causalidad del incendio.

En España, en los años 2017 y 2018, se han producido 13822 y 7143 incendios forestales respectivamente, afectando a unas superficies totales de 178436 y 29907 ha. En relación con la causalidad del incendio, analizando una serie temporal (del 2002 al 2015) se observa que el 54% de los incendios han sido intencionados, el 26% debido a una negligencia/accidente, y un 13% de causa desconocida. Analizando las causas de negligencia/accidente, se aprecia que la mayoría de los incendios son debidos a la quema agrícola y a motores y máquinas. Estos últimos representan de media un 3.18% de los incendios totales.

En el caso concreto de Aragón, en los años 2017 y 2018, se han producido 464 y 226 incendios forestales respectivamente, que han afectado a 908 y 215 ha. La causa más importante de dichos incendios fueron las negligencias/accidentes, con un 46% de los incendios en 2017 y un 49% en 2018. De un análisis más detallado de esta causalidad se concluye que la ignición de motores y máquinas agrícolas (incluidas cosechadoras) tienen una importancia significativa, siendo responsables de un 7% del total de incendios ocurridos en 2017 y de un 9% de los que tuvieron lugar en 2018.

Los datos presentados constatan la gran importancia de las negligencias y las causas accidentales en el origen de los incendios forestales en nuestra región, y, en concreto, la significativa contribución de los motores y máquinas como origen de los mismos.

Las posibles causas de generación de incendios en las máquinas agrícolas –y concretamente en cosechadoras– son muy variadas. Quick (2010) enumera una serie de zonas potenciales para la generación del incendio: el motor y los conductos de salida de gases de combustión, las transmisiones, los cojinetes, los frenos, los cortocircuitos eléctricos, el impacto de los cabezales de siega con piedras u otros elementos, y la introducción de objetos extraños en la máquina. De todas ellas, la causa más común es la acumulación de material combustible en las zonas con altas temperaturas situadas cerca del motor, puesto que las temperaturas en la superficie de estos elementos pueden alcanzar los 500 °C (Quick, 2010), siendo muy superiores a la temperatura de ignición de los residuos del cultivo.

Para que se produzca un incendio es necesario un material combustible que sea calentado a temperaturas superiores a su temperatura de ignición, la presencia de oxígeno (comburente) y la posibilidad de propagación del incendio (Quick, 2010). El material combustible en el caso objeto de estudio es el residuo del cultivo, es decir, una mezcla de polvo y paja de pequeño tamaño que se acumula en distintas partes de la máquina. La temperatura de ignición se evalúa a través de la temperatura mínima de ignición/inflamación de una capa de polvo y se define como: “la temperatura más baja de una superficie caliente a la que se produce la inflamación de una capa de polvo de grosor especificado sobre dicha superficie caliente” (EN ISO/IEC 80079-20-2, 2016). Dicha temperatura de ignición puede variar en función de la naturaleza del polvo, el grosor de la capa y el tamaño de las partículas (Eckhoff, 2009).

La paja de trigo está formada mayoritariamente por celulosa (Romero-Uscanga et al., 2014), con alta concentración de volátiles, bajo contenido de cenizas (García Torrent et al., 2016; Fernández-Anez & García-Torrent, 2019) y una alta relación H/C (García Torrent et al., 2016). Existen diversos trabajos que relacionan la naturaleza (composición y características químicas) de ciertos tipos de biomasa con la temperatura de ignición. García Torrent et al., (2015) comparó distintos tipos de biomasa, entre las que se incluye la paja de trigo. Los resultados de ese estudio sugieren que el contenido de lignina tiene una influencia en el riesgo de autoignición, de modo que un mayor contenido de lignina implica un mayor riesgo de autoignición, que sería más importante que el asociado a la materia volátil. De hecho, en otro estudio en el que se compararon 10 muestras con diferente composición de carbón, lodos de aguas residuales y madera torrefactada (Fernández-Anez et al., 2018), concluyeron que la temperatura de ignición aumenta al aumentar el contenido de volátiles (disminuyendo el contenido de cenizas), por lo que el encendido de la capa de polvo requiere una temperatura más alta (su reactividad es menor).

Polin et al., (2013) comparó muestras de polvo de maíz y de girasol con distintos tamaños (710-300 µm, 300-150 µm, 150-63 µm y 63-25 µm). Los resultados mostraron que la temperatura de ignición disminuye con la disminución del tamaño de las partículas de polvo, tanto para las muestras de maíz como de girasol, por lo que los polvos más finos presentan mayor riesgo de ignición. No obstante, existen diferencias en función del material combustible: por ejemplo, las muestras de girasol presentaron

temperaturas de ignición 30 °C menores que las muestras de maíz para tamaños de partícula similares. El mismo estudio concluye que, además del tamaño de partículas, las características físicas de las muestras también afectan a la temperatura de ignición de dichas muestras. Una mayor superficie específica [m^2/g] disminuye la temperatura de ignición, pues a mayor superficie permite una transferencia de calor más rápida desde la placa caliente a las partículas de polvo. Un mayor volumen de poros disminuye la temperatura de ignición de la biomasa, ya que permite que más aire se difunda fácilmente en el núcleo interno de la partícula, permitiendo así que el oxígeno reaccione mejor con la biomasa para lograr la combustión.

Fernandez-Anez & Garcia-Torrent, (2019) compararon distintos tamaños de partícula (polvo y elementos gruesos) de diferentes materiales, entre los que se incluyó la paja de trigo, para dos espesores (5 mm y 50 mm, sin compactar y compactado). Concluyó que para el menor espesor (5 mm), la temperatura necesaria para la ignición del polvo era menor que para los elementos gruesos. Esto se explica porque, mientras que en los elementos gruesos los espacios entre los gránulos conectan casi directamente la superficie caliente con el aire de la parte superior de la capa (aumentando las pérdidas de calor y disminuyendo la superficie de contacto entre el material y la superficie), en las capas de polvo la superficie de contacto aumenta (debido a la disposición de las partículas, que cubren completamente la parte interna del anillo de aluminio). Al ser los espacios entre partículas más pequeños para el polvo, disminuyen las pérdidas de calor y se favorece la ignición. Estos resultados coinciden con los de (Polin et al., 2013). En relación con el efecto del espesor de la capa de material combustible sobre la temperatura de ignición, se observó que, para un mismo tamaño de partícula, la temperatura de ignición disminuía con el espesor, corroborando que a mayor espesor, se requiere menor temperatura de ignición. Por último, el estudio concluía que la compactación favorece la autoignición solamente para algunos materiales: en el caso de la paja de trigo, la compactación no modificó la temperatura de ignición (Fernandez-Anez & García-Torrent, 2019).

En cuanto a la propagación del incendio, las condiciones de campo pueden favorecer o dificultar el proceso, existiendo cuatro factores que condicionan dicha propagación: la humedad relativa, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, y el tipo y condición de cultivo (Quick, 2010; Cardil et al., 2014). La temperatura ambiente es el factor más relevante en el riesgo de incendio (Cardil et al., 2014), por lo que algunos países establecen índices de riesgo de incendio en función de las condiciones ambientales, como el índice GFDI (*Grassland fire danger index*) en Australia, que fija la máxima velocidad de viento admisible para una temperatura y humedad relativa existentes, de modo que no se puede trabajar en campo con la máquina agrícola si las condiciones ambientales no son las adecuadas. En España, la página web de AEMET publica diariamente el índice de riesgo de incendio FWI (*Fire Weather Index*) para toda España. El FWI valora el riesgo de inicio de incendio y su posible comportamiento, a partir de la temperatura, el viento y la humedad de los combustibles. El nivel de riesgo se determina a partir de una escala con 5 categorías (bajo, moderado, alto, muy alto y extremo). Por ejemplo, en el caso de Aragón se calcula un índice de riesgo diario que clasifica el riesgo en 4 categorías (baja, media, alta y extrema). Este riesgo de incendio puede ser máximo si se cumple la *regla del 30*, es decir, cuando se dan a la vez las

siguientes condiciones meteorológicas: temperatura > 30 °C, viento > 30 km/h, humedad relativa del aire < 30%.

Pese a la importancia de las consecuencias de los incendios agrícolas y forestales, los estudios centrados en las causas de los incendios en cosechadoras de cereales son escasos en la bibliografía. Hasta la fecha, los estudios más importantes han sido los realizados en Estados Unidos por el grupo de Shutske (Shutske & Field, 1988; Shutske J. M. et al., 1990), en los que se investigaron más de 4000 incendios en cosechadoras y tractores, pudiendo acceder en 265 casos a las máquinas incendiadas para realizar sobre ellas un estudio detallado. En base a los datos obtenidos, los autores concluyeron que el 74% de los incendios se originaron en la zona del motor por diferentes causas (calentamiento de superficies, salida de gases de combustión y componentes eléctricos). También llegaron a la conclusión de que el material que inició el incendio generalmente fueron los residuos del cultivo recolectado, por delante de los restos de combustible y aceite.

En un estudio sobre accidentes de cosechadoras realizado por Keskin & Şekerli, (2018), basado en noticias sobre 194 incidentes producidos entre 2002 y 2017, se estimó que en un 59.8% de los casos, dichos incidentes ocurrieron en campo (y el 40.2% restante en carretera). De los incidentes de campo, el accidente más frecuente fue a consecuencia de un incendio (41.4%), teniendo habitualmente origen en el motor, aunque también se hace referencia al choque de la barra de corte con piedras y al contacto de la máquina con líneas eléctricas áreas como posibles causas de incendio.

En Australia, otro estudio realizado por el grupo Kondinin (White & Giumelli, 2006) a 1170 agricultores reflejó que aproximadamente el 25% de los encuestados habían experimentado un incendio en sus cosechadoras. Según los datos facilitados por los agricultores, la principal causa de incendio fue la acumulación de polvo y restos de cosecha en las superficies calientes de la máquina (33% de los casos), seguida por el calentamiento de los cojinetes (22%). Los autores incidieron en que un mantenimiento y limpieza regular de la máquina son clave para la reducción del riesgo de incendio.

En otro estudio llevado a cabo también en Australia, Quick (2010) analizó 77 casos de incendios en cosechadoras, estimando que el 45% de los incendios se originaron en la zona del motor, seguidos por cojinetes y transmisiones con un 22%. Asimismo, dicho estudio observó que la acumulación de carga electrostática es una causa importante de incendio, haciendo también hincapié en la importancia del mantenimiento y la vigilancia del equipo para evitar los incendios. El autor concluyó que es posible alcanzar una reducción de los incendios mediante la introducción de mejoras en el diseño de las cosechadoras, como la utilización de corrientes de aire dirigidas a ventilar la acumulación de polvo y restos de cultivo en la zona del motor. A este respecto, es preciso aclarar que algunas empresas ya ofertan equipamientos complementarios a los extintores clásicos: se trata de sistemas de extinción indirectos que aplican productos específicos para la extinción de incendios a través de una instalación fija con boquillas colocadas en diferentes zonas de la máquina, que se alimentan mediante un sistema de tuberías desde botellas de producto antiincendios (polvo seco, líquido, duales) ubicadas en la máquina. En base a información recopilada por sensores de temperatura, el sistema se activa automáticamente cuando la temperatura en las zonas de riesgo de la máquina sobrepasa unos valores umbral. La eficacia de este tipo de sistemas ha sido analizada en diferentes estudios científicos, mostrando su viabilidad (Shutske et al., 1994).

1.2. Características técnicas de las cosechadoras de cereales

Las cosechadoras de cereales son máquinas autopropulsadas, con ruedas delanteras motrices de mayor tamaño y ruedas traseras directrices. En ocasiones se utiliza propulsión a las 4 ruedas. El motor de combustión generalmente se sitúa en una posición elevada y acciona los mecanismos de la máquina, a la vez que se encarga de la propulsión. La transmisión del movimiento a las ruedas incluye un sistema hidrostático (las ruedas incorporan un motor hidráulico) que permite modificar de manera continua la velocidad de avance, normalmente entre 2 y 20 km/h, aunque las velocidades de trabajo son más reducidas, entre 4 y 8 km/h, habitualmente. El puesto de conducción se encuentra en una posición elevada sobre el cabezal que realiza la siega. En todas las máquinas se distinguen tres partes o mecanismos fundamentales: el mecanismo de siega, el de trilla y el de separación y limpia (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008).

El mecanismo de siega de las cosechadoras de cereales está compuesto por la barra de corte, que es la encargada de cortar la mies. El corte se produce al ser atrapadas las plantas entre los dedos y las cuchillas por cizalladura en su movimiento de vaivén. El molinete, se sitúa en la barra de corte y tiene por misión acercar la mies hacia la barra de corte para, una vez segada, empujarla sobre el sinfín alimentador, evitando que pueda caerse por delante de la barra. El molinete está formado por una barra metálica central o eje de giro, alrededor de la cual van generalmente cinco o seis listones de los cuales cuelgan unas púas flexibles, encargadas de empujar la mies. El sinfín alimentador tiene como misión canalizar toda la mies segada por la barra de corte hacia el centro de la plataforma donde es recogida por los dedos retráctiles y empujada sobre la banda elevadora. Por ello, el sinfín tiene la mitad de su hélice enrollada en un sentido y la otra mitad en el contrario. El movimiento suele llegar a la plataforma por medio de una correa que hace girar una polea. Esta última lo transmite a la banda elevadora a través de un eje, y a la barra de corte, molinete y sinfín a través de un juego de cadenas y correas.

El mecanismo de trilla es el encargado de separar el grano de las espigas y de la paja, con una efectividad en torno al 90%. Los órganos fundamentales del mecanismo de trilla son el cilindro desgranador y el cóncavo. El cilindro desgranador más utilizado es el que dispone barras periféricas (entre 6 y 8) de acero, cuya zona exterior es estriada, dispuesta con sus ranuras orientadas en sentidos opuestos. Con las estrías se consigue que la mies haga un movimiento de zigzag evitando que se amontone en un solo lado a su paso por la trilla. El zigzag facilita además la separación del grano de la paja. El cóncavo junto al cilindro desgranador conforma la unidad de trilla. El cóncavo envuelve parcialmente al cilindro desgranador, con un ángulo variable entre 75° y 120° (Cabreró Sopena & Catalán Mogorrón, 2010); tiene de 9 a 17 barras transversales paralelas a las del cilindro y un número variable de alambreas perpendiculares a éstas. El molinete expulsor está situado inmediatamente después del cilindro desgranador. Gira en el mismo sentido que éste y tiene por misión recoger la paja que va saliendo entre cilindro y cóncavo, frenándola y dejándola caer al principio de los sacudidores.

El mecanismo de separación y limpia se encarga de la separación de los granos de la paja. Actualmente existen dos grandes tecnologías: a) sacudidores (sistemas convencionales); b) separadores rotativos.

Los sistemas convencionales están constituidos por los sacudidores y la caja de cribas. Reciben la paja larga y el grano tras pasar por el cilindro desgranador. El número de sacudidores oscila de 3 a 6 según sea el tamaño de la cosechadora, y están hechos de un armazón de chapa formando escalones, dotados de un movimiento de vaivén. El fondo de los sacudidores está enrejillado para que a lo largo del recorrido vaya cribándose el grano. La plataforma de preparación está situada debajo del cóncavo y de los sacudidores. Recoge todo el grano que cae de ambos elementos. Está formado por una superficie estriada dividida transversalmente en dos o más zonas. Todo este conjunto tiene un movimiento de vaivén que hace que el grano vaya pasando hacia atrás y colocándose debajo de la paja y del tamo por ser más pesado. Al llegar al final cae sobre las cribas. La caja de cribas está formada por dos cribas, una inferior y otra superior. La caja de cribas va dotada de un movimiento vaivén para facilitar la separación al mismo tiempo que desplaza el tamo y la paja hacia atrás. El ventilador es el encargado de crear una fuerte corriente de aire por la parte baja de las cribas para facilitar la limpieza del grano. El grano que ha pasado por las cribas cae resbalando por una chapa inclinada hasta un sinfín que lo conduce hasta el elevador. El elevador de grano puede ser de tornillo sinfín o de cangilones, el grano es conducido directamente a la tolva, un depósito donde se va almacenando el grano, para después, por medio de unos tornillos sinfín (tubo de descarga) sacarlo hacia un remolque o camión (Laguna Blanca, 1999; Ortiz-Cañavate, 2003).

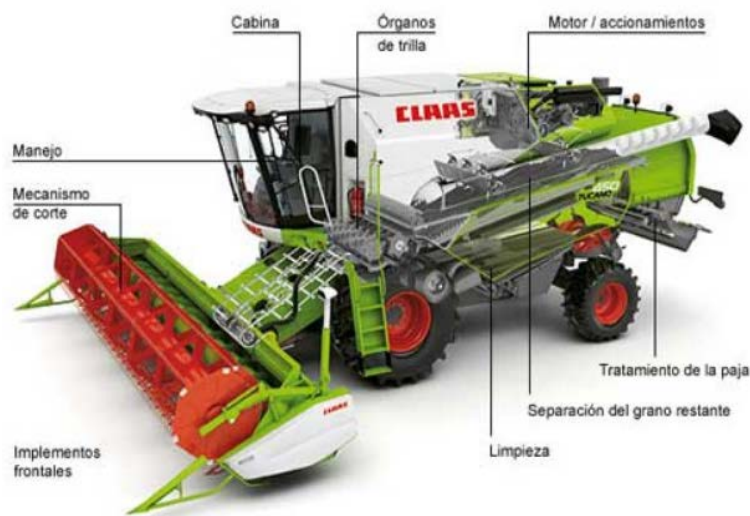


Figura 1. Partes de una cosechadora. Fuente: Claas.

Los sistemas rotativos pueden llegar a sustituir al cilindro desgranador tradicional por un único elemento (rotor longitudinal), aunque en otros casos se combinan en la parte posterior del cilindro desgranador constituyendo un sistema mixto (cilindro desgranador clásico + rotor separador). Pueden estar constituidos por uno o dos rotores longitudinales. Este rotor o rotores presentan longitudes elevadas (de hasta más de 4 m) y disponen también de un cóncavo. Bajo los rotores se sitúan las cribas de forma similar a los sistemas convencionales. Esta tecnología se conoce como de “separación forzada”, presentado la ventaja de que el proceso de trilla y separación se realizan en menos tiempo, permitiendo cosechar a mayor velocidad y hasta con cultivos verdes y húmedos (Valero Ubierna, 2005).

A lo largo de los años ha habido una evolución de la legislación medioambiental que ha obligado a incorporar nuevos sistemas en la fabricación de las cosechadoras ligados al control de los gases de escape de los motores: las normas *TIER* (normativa de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.) y *STAGE* (normativa de emisiones de motores de la UE). El objetivo final de este tipo de normativas es limitar los niveles máximos de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas (PT) en el escape de los motores (Moya González & Barreiro Elorza, 2011).

A partir de estas normativas, se han introducido cambios importantes en el sistema de inyección, como la incorporación del *common-rail*, que consiste en el control electrónico de los inyectores, que se encuentran conectados al raíl común mediante conductos de alta presión y producen la inyección de combustible en el momento requerido. También se han desarrollado distintos sistemas de tratamientos en la salida de gases, con el objetivo de reducir al máximo la emisión de gases contaminantes:

- Tecnología EGR (*Exhaust gas recirculation*), se basa en volver a introducir a la cámara de combustión, una vez refrigerados, parte de los gases procedentes de la combustión. La cantidad de gas recirculado se controla electrónicamente. Esta tecnología permite reducir la generación de óxidos de nitrógeno (NO_x). Además, los motores deben incorporar un catalizador oxidante (DOC) para reducir la emisión de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) y un filtro de partículas para reducir la emisión de partículas (PT).
- Tecnología SCR (*Selective catalytic reduction*), consiste en la inyección de urea en el conducto de escape con el objetivo de que los óxidos de nitrógeno generados en la combustión del motor reaccionen con el amoníaco de la urea para producir nitrógeno y agua, los cuales ya no tienen un efecto contaminante. Para obtener amoníaco a partir de la urea ésta debe haber sido calentada previamente. La urea que se utiliza es conocida como *AdBlue*. Los sistemas SCR también pueden incorporar filtros de partículas y catalizadores oxidantes.

A parte de tener en cuenta la contaminación medioambiental, también se han buscado nuevos sistemas para mejorar el rendimiento de las cosechadoras durante la siega. Se han desarrollado novedades en los sistemas de refrigeración, trilla y separación, entre las que destacan las siguientes:

- Sistemas de refrigeración más eficientes. Un ejemplo es el sistema "*Dynamic Cooling*" de Claas (Figura 2) en el que se sustituye al clásico ventilador lateral por una gran criba rotativa con un diámetro de 1.60 m. Este sistema mejora sustancialmente la refrigeración del motor desde la parte alta de la máquina (donde se encuentra el aire más limpio y frío). Utiliza un ventilador eléctrico de alta potencia que trabaja a succión inyectando aire a los sistemas de refrigeración. Trabaja con una velocidad variable según las necesidades del motor. Por otra parte, el aire que sale por los laterales de la máquina crea una cortina de protección que salvaguarda el motor de la acumulación de polvo reduciendo el mantenimiento (Barreiro Elorza, 2016).
- Actividad de nivelación de la máquina. Existen máquinas autonivelantes tanto transversal como longitudinalmente que permiten el trabajo en pendientes de hasta el 45%.

- Barra de corte. La anchura del corte ha ido aumentando, encontrando cortes con una anchura de trabajo superior a los 9 m y se han incorporado sistemas de nivelación que compensan automáticamente las pendientes hasta un 22%. Por último, los cabezales son más ligeros y resistentes, además de presentar un mayor control sobre el molinete, barra de corte con dientes aserrados y otros automatismos. También se han desarrollado barras de corte flexibles, adaptables por lo tanto a las irregularidades del terreno.
- Cabina. Uno de los objetivos ha sido aumentar el confort del conductor (mayor amplitud y visibilidad), otro objetivo es facilitar el manejo de la máquina, para ello, se busca la centralización de los controles en un solo mando, así como la presencia de una sola pantalla. Por último, permite la visualización de datos a tiempo real, gracias a la incorporación de sensores electrónicos por toda la máquina.

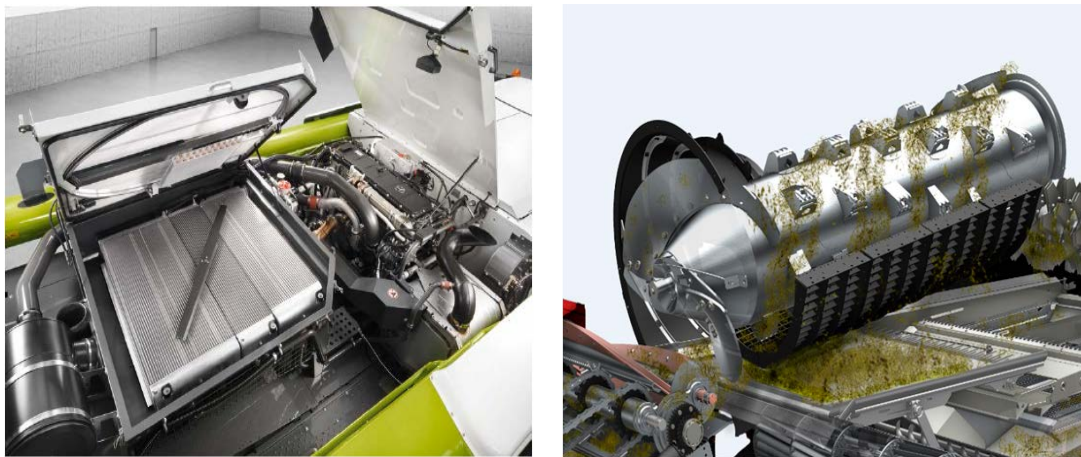


Figura 2. Sistema de ventilación 'Dynamic Cooling' (izq.) y detalle de un rotor de trilla (dcha.).
Fuente: Claas y Case IH.

1.3. Condicionantes de fabricación de las cosechadoras relacionados con la seguridad frente a incendios

Los fabricantes de cosechadoras deben cumplir diferentes normativas relacionadas con la seguridad de la máquina. Concretamente, las siguientes:

- Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 17 de mayo de 2006 relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE. También denominada "Directiva Máquinas".
- Norma UNE-EN ISO 4254-7:2017. Maquinaria agrícola. Seguridad. Parte 7: Cosechadoras de cereales, de forraje, de algodón y de caña de azúcar. (ISO 4254-7:2017).

La Directiva 2006/42/CE tiene el doble objetivo de armonizar los requisitos de salud y seguridad que se aplican a las máquinas sobre la base de un nivel elevado de protección de la salud y de la seguridad y, al mismo tiempo, garantizar la libre circulación de las máquinas en el mercado de la UE.

La Norma UNE-EN ISO 4254-7 debe aplicarse junto a la Norma ISO 4254-1, y especifica los requisitos de seguridad y su verificación para el diseño y fabricación de

cosechadoras de cereales, picadoras de forraje, cosechadoras de algodón y cosechadoras de caña de azúcar. Describe los métodos para la eliminación o reducción de riesgos derivados del uso previsto y del mal uso razonablemente previsto de estas máquinas por una persona en el curso de las labores normales de trabajo y reparación. Adicionalmente, especifica el tipo de información relativa a las prácticas de trabajo seguras que debe suministrar el fabricante.

En el apartado 4.10 titulado “peligro de incendio” de la norma refleja lo siguiente:

- Se debe de prever la colocación de extintores de incendios en la proximidad del puesto de trabajo del operador.
- El fabricante debe de incluir en el manual del operador recomendaciones acerca del número, tipo y localización de los extintores de incendios.

Podemos observar que la legislación, en referencia a los incendios en máquinas es muy simple, la única obligación es la colocación de extintores, sin ningún tipo de especificidad ni regulación al respecto.

Durante la fabricación de cosechadoras se llevan a cabo una serie de medidas por parte de los fabricantes con el objetivo de minimizar los riesgos de incendio. En las siguientes líneas se muestra la información al respecto facilitada por la Asociación Nacional de Maquinaria Agropecuaria, Forestal y de Espacios Verdes, ANSEMAT, (obtenida de los principales fabricantes de cosechadoras):

- Diseño de la máquina pensado en minimizar torsiones.
- Materiales especiales en las partes de la máquina sometidas a fricción, especialmente en el corte, en las partes en contacto directo con el suelo.
- Aislamiento con material vegetal de elementos sometidos a altas temperaturas. El tubo de escape está aislado térmicamente.
- Diseño de deflectores, cajones y chapas laterales inclinados para reducir la acumulación de residuo. Además, se diseñan las esquinas del compartimento del motor en ángulo para reducir la acumulación de residuo.
- Pantallas que garantizan la entrada de aire totalmente limpio al radiador y al motor. Superficies de protección del motor completamente lisas.
- Filtros de aire adicionales para optimizar la refrigeración y evitar sobrecalentamiento del motor.
- Separación de componentes del motor para minimizar el riesgo de acumulación de residuos.
- Sistema de engrasado automático de las partes sometidas a rozamiento continuo.
- Diseño de las cribas de aluminio para reducir el peso y esfuerzo en los rodamientos.

1.4. Estado del parque de cosechadoras en Aragón y España

A partir de la base de datos de cosechadoras de cereales procedente del Registro Oficial de Maquinaria Agrícola (ROMA) se han analizado las características del parque de cosechadoras tanto de Aragón como de España. Dicha base de datos contiene información de cosechadoras desde el año 1952 hasta la actualidad. Ofrece información sobre la marca y modelo de la máquina, potencia, fecha de inscripción, motivo de alta, provincia, municipio, etc.

En España el censo real de cosechadoras es de 28816 máquinas, desglosadas en: compra de máquina nueva (7510); compra máquina usada de importación (1144); cambio de titularidad (18659) y otros motivos (1503). Siendo Castilla y León, Castilla La Mancha y Aragón con 7129, 5440 y 5245 máquinas, respectivamente, las comunidades con mayor número de cosechadoras, representando el 62% de las máquinas de toda España (Figura 3).

En Aragón, las 5245 máquinas se desglosan en: compra de máquina nueva (1310); compra máquina usada de importación (205); cambio de titularidad (3650) y otros motivos (80). Se distribuyen del siguiente modo: 2723 máquinas en Zaragoza, 1742 máquinas en Huesca y 780 máquinas en Teruel. Representando un 18% del total de las máquinas de España.

Canarias, que no se muestra en el mapa, se estima que tiene un censo de 10 máquinas.



Figura 3. Censo real de cosechadoras en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).

Una vez se ha determinado el número de máquinas, la Figura 4 muestra las marcas más representativas tanto en España como en Aragón. En España las marcas más habituales son John Deere (7820), Claas (5877) y New Holland (5828), que suman el 68% del total. En Aragón, destacan New Holland (1095), John Deere (945) y Claas (935), representando el 57% del total.

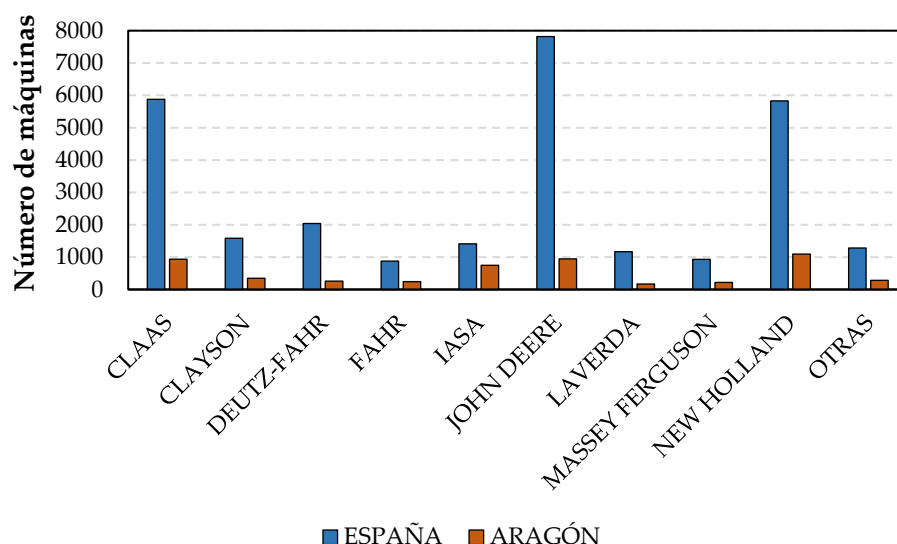


Figura 4. Censo real de cosechadoras por marcas en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).

Por último, se muestra la distribución de las máquinas por potencias tanto para España como para Aragón (Figura 5). En España, un 33% de las máquinas tiene una potencia de 100 a 130 CV, porcentaje algo mayor en Aragón (38%), y que está asociado a máquinas antiguas (principalmente de particulares). No obstante, mientras que en España el 28% de las máquinas tienen una potencia comprendida entre 224 CV-471 CV, en Aragón esta cifra se reduce a un 21%. Comparativamente, la potencia de las máquinas en Aragón sería menor que la de otras regiones.

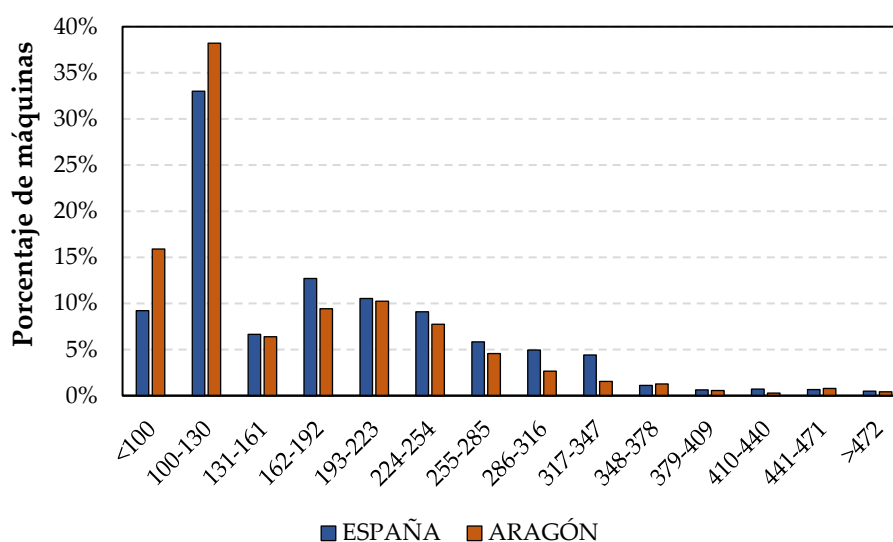


Figura 5. Porcentaje de cosechadoras en función de su potencia en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).

1.5. Distribución geográfica de los incendios originados por maquinaria agrícola en Aragón

El Gobierno de Aragón dispone de una base de datos con incendios reales producidos en Aragón por cosechadoras y empacadoras, de la que se ha podido disponer de información correspondiente al periodo 2005-2017. Esta base de datos aporta información sobre la causa del incendio, la fecha en la que se produjo, el municipio, la superficie afectada y las coordenadas geográficas.

Utilizando el software libre QGIS v.2.18 (QGIS Development Team), se han realizado dos mapas: un mapa de distribución de incendios por comarcas y año (Figura 6) y un mapa de distribución de incendios por tierras de labor de secano o regadío (Figura 7).

En la Figura 6 se puede apreciar que la distribución de los incendios se agrupa principalmente en la Hoya de Huesca, Los Monegros y las Cinco Villas. Además, se observan incendios en La Litera, Somontano, Jiloca, Campo de Daroca y Calatayud, pero en menor medida. En la Figura 7 se aprecia que los incendios se produjeron tanto en zonas de regadío como de secano. Este resultado, que podría resultar inesperado, se justifica por existencia de dobles cosechas en las zonas de regadío, en las que se incluye el cereal.

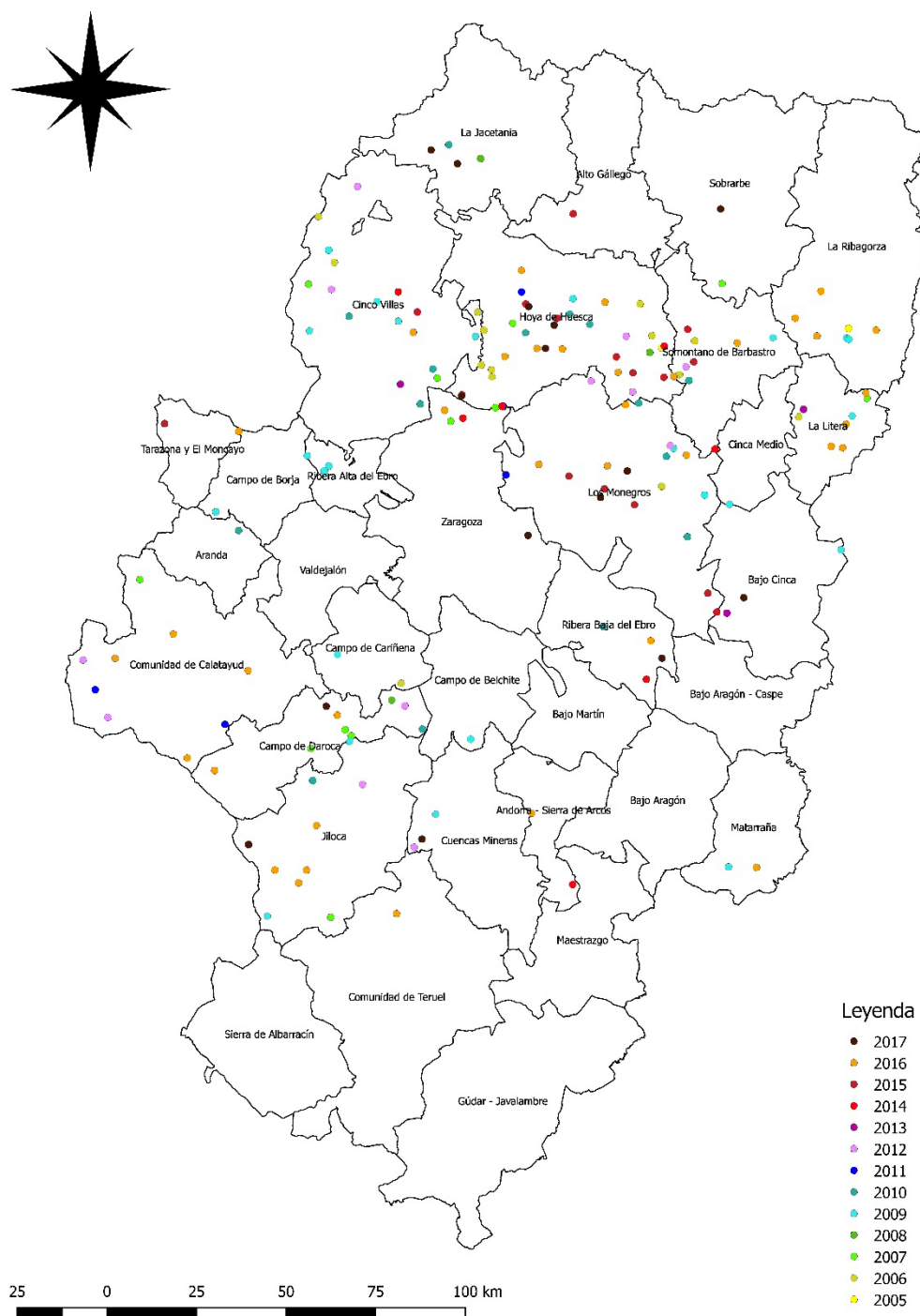


Figura 6. Distribución de incendios por comarcas y año. (Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón).

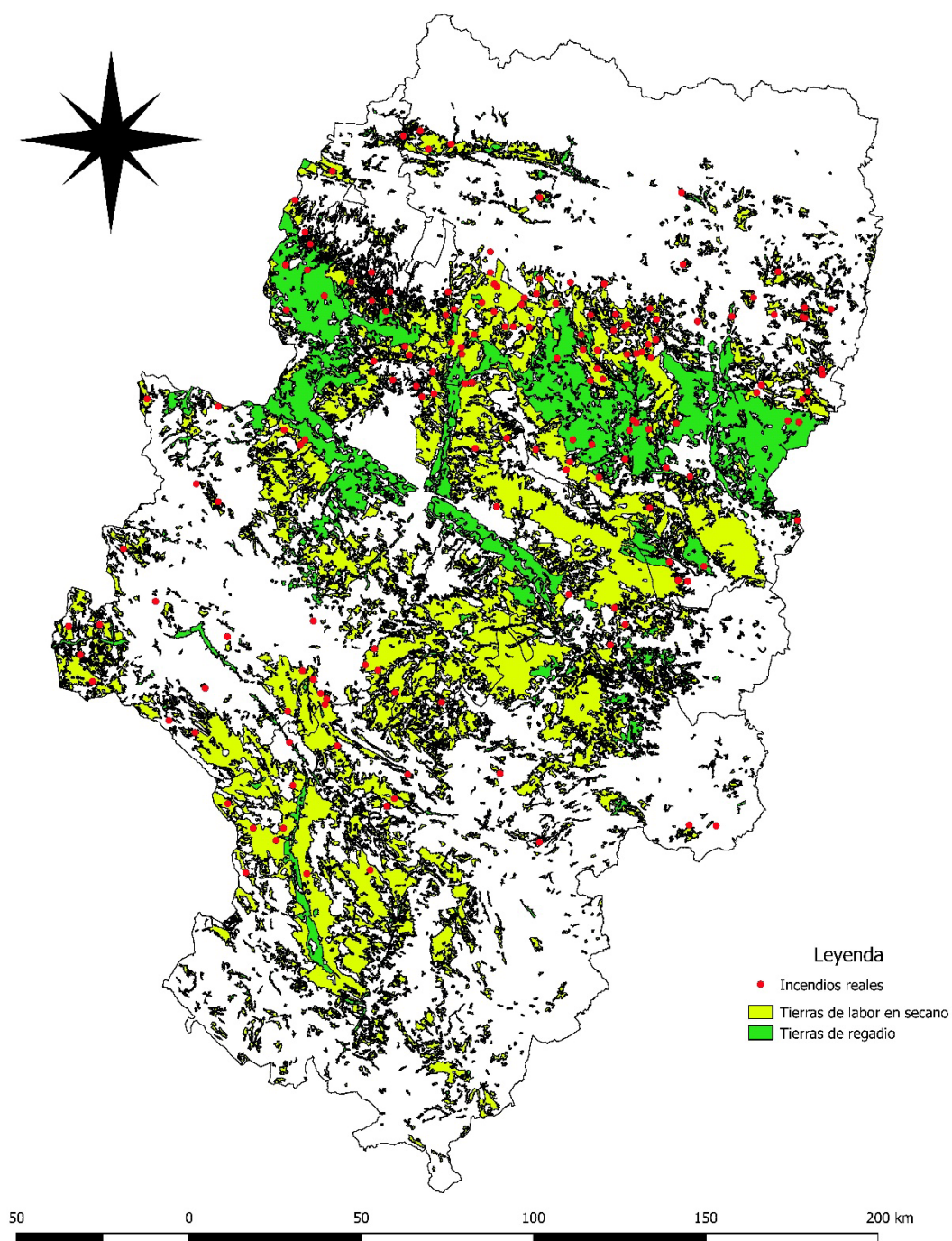


Figura 7. Distribución de incendios por tierras de secano/regadío. (Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Determinación de puntos críticos de riesgo en cosechadoras

2.1.1. *Encuesta*

Se ha realizado una encuesta entre propietarios de cosechadoras en Aragón dirigida a la identificación de puntos críticos de la maquinaria y a la caracterización del perfil de las máquinas con mayor riesgo de incendio. La encuesta se distribuyó a través de la Asociación Agraria de Jóvenes Agricultores (ASAJA) y la Asociación Aragonesa de Agricultura de Conservación (AGRACON) entre los socios de dichas asociaciones, pudiendo participar desde julio hasta diciembre del año 2018, además de en una jornada técnica organizada por ASAJA y llevada a cabo en la Escuela Politécnica Superior de Huesca en 2018.

En el siguiente enlace se puede visualizar la encuesta completa: <http://bit.ly/encuestacosechadoras>.

La encuesta se estructuró en dos bloques:

- Características técnicas de la máquina: información relativa a: marca, potencia, antigüedad de la máquina, hectáreas cosechadas, etc.
- Características del incendio en la cosechadora: información relativa a cultivo cosechado, zona de la máquina donde se originó el incendio, etc.

Posteriormente se realizó un análisis estadístico de los datos con el software SPSS v.18 (IBM, Chicago, IL, EE.UU.).

El análisis constó de tres partes: en primer lugar, un análisis de la relación entre las variables potencia, antigüedad y hectáreas anuales cosechadas, creando además una nueva variable “hectáreas acumuladas”, que representa el número de hectáreas cosechadas hasta el momento del incendio (es decir, has anuales x antigüedad) y hace referencia al uso de la máquina en el momento del incendio. En una segunda etapa, se estudió la relación de las variables anteriormente comentadas con el riesgo de incendio, utilizando tablas de contingencia. Para ello se crearon variables categóricas para las hectáreas acumuladas (0-2000 ha, 2001-4000 ha, 4001-6000 ha y >6000 ha) y para la antigüedad de la máquina (0-10 años, 11-20 años y >20 años). En la tercera fase del análisis se investigaron las zonas de origen de los incendios.

2.1.2. *Estudio del parque de cosechadoras*

Con el fin de conocer el perfil de aquellas máquinas que presentan el perfil de mayor riesgo de incendio, se ha estudiado el parque de cosechadoras de España y de Aragón, tomando como punto de partida la base de datos de cosechadoras de cereales procedente del ROMA.

Dado el gran número de máquinas y la dificultad de conocer las máquinas que realmente se encuentran activas, se fijaron dos criterios de filtrado, clasificando las máquinas en dos grupos:

- Cosechadoras en censo vivo. A este grupo pertenecen las máquinas filtradas por estado de alta para los motivos: compra de máquina nueva, máquina usada de importación y cambio de titular.
- Cosechadoras en uso. Se ha tomado como criterio el motivo de alta, y se han incluido las siguientes tipologías de máquinas:
 - Compra de máquina nueva: máquinas inscritas por primera vez en los últimos 15 años.
 - Usada de importación: máquinas inscritas en los últimos 10 años.
 - Cambio de titular: máquinas inscritas en los últimos 10 años.

Se trabajó en todo momento con dos bases de datos: una para España y otra específica de Aragón.

2.2. Estudio del material comburente

2.2.1. Recogida de muestra

En la campaña de cosecha del año 2018 se recogió muestras de residuo acumulado en las cosechadoras (Figura 8). La recogida del residuo se realizó en 5 máquinas, previo al mantenimiento diario de la máquina. Cuatro máquinas tenían residuo de trigo y una, residuo de cebada. La muestra se recogió de distintas zonas de la máquina (corte, picador, zona del motor y ejes de la rueda) con el objetivo de caracterizar la granulometría del residuo de las diferentes partes de la máquina.



Figura 8. Acumulación de residuo en distintas partes de la máquina.

La preparación de la muestra consistió, en primer lugar, en el secado de residuo en una estufa a 105 °C durante 24 horas (Figura 9).



Figura 9. Estufa donde se realizó el secado de las muestras (izq.) y muestra de residuo secado (dcha.)

Posteriormente, se realizó el tamizado de las muestras, para ello se utilizó una torre de tamices (Figura 10) en la que se colocó 5 tamices con una apertura de malla de 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μm y 250 μm . Una vez determinado el tamaño del tamiz y colocando el de mayor diámetro de partícula en la parte superior y el de menor partícula en la parte inferior se programó la intensidad y el tiempo de vibración del siguiente modo: tiempo de tamizado de 3 minutos y amplitud de onda de 2 mm.

Cabe puntualizar que el peso de la muestra añadida en cada tamizado fue similar, puesto que, si esto variara, utilizando el mismo programa de tamizado podría existir un cierto error en la muestra tamizada.



Figura 10. Torre de tamices modelo BA200N (CISA, Barcelona, España) con los 5 tamices utilizados.

En la Figura 11 se muestra una muestra de las 6 granulometrías obtenidas tras el proceso de tamizado.

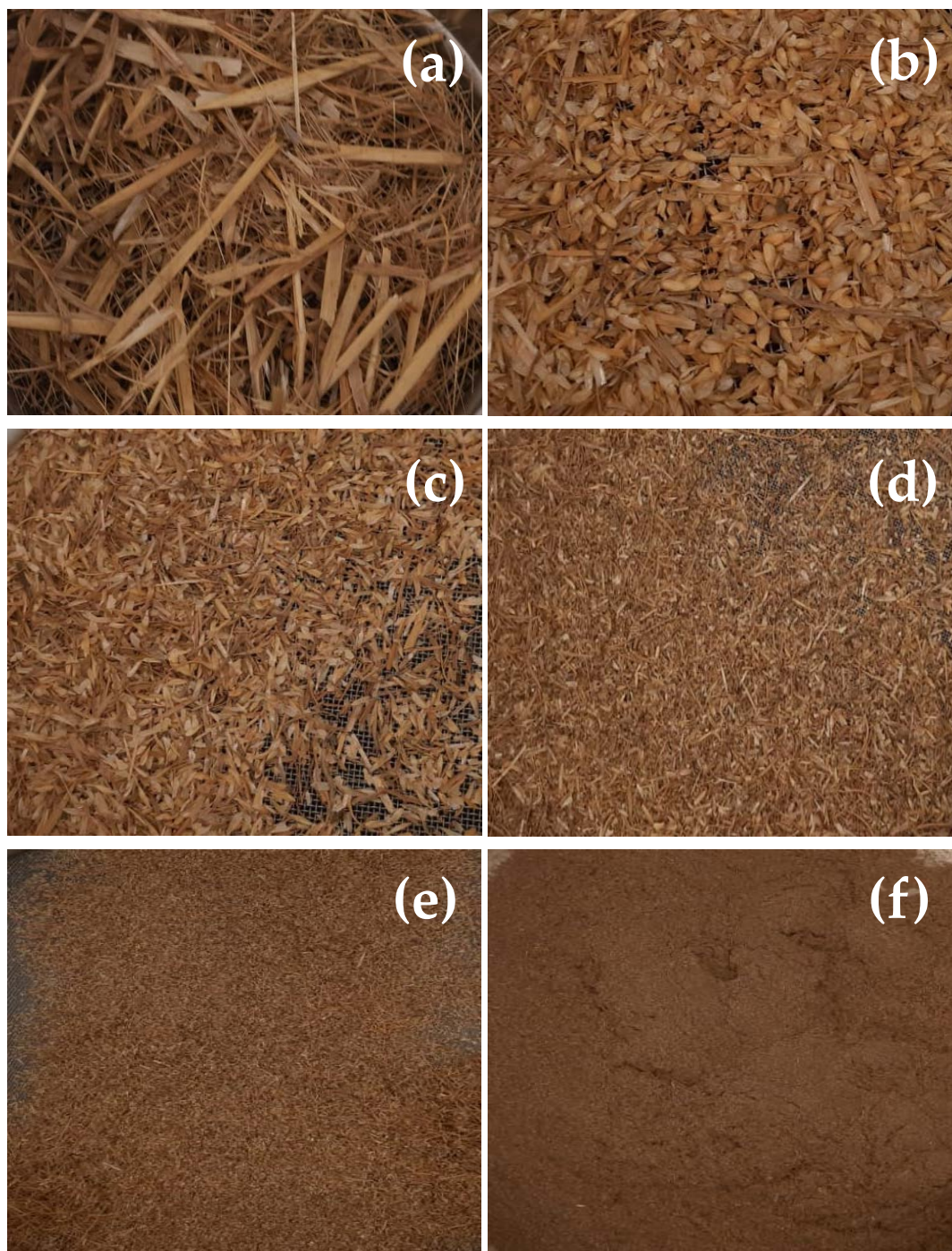


Figura 11. Muestras de los 6 tamaños tamizados. a) 4 mm; b) 2 mm; c) 1 mm; d) 500 μm ; e) 250 μm ; f) <250 μm .

2.2.2. Análisis inmediato

Se realizó el análisis inmediato de las muestras de cebada y trigo recogidas, el análisis inmediato consiste en la medición de la humedad, material volátil, contenido de ceniza y carbono fijo del residuo.

Medición de humedad

La medición de la humedad en paja de trigo y cebada se realiza a través de la norma UNE-EN ISO 18134-3:2016. *“Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general”*.

La porción de biocombustible sólido se seca a una temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$, en atmósfera de aire hasta que se alcance masa constante y el porcentaje de humedad se calcula a partir de la pérdida de masa de la porción de ensayo. La masa utilizada para la realización del ensayo fue de 1 g.

El contenido de humedad, M , de la porción de ensayo, expresado como un porcentaje de masa, debe calcularse usando la ecuación (1):

$$M = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

M_1 : masa en gramos del crisol vacío y la tapa.

M_2 : masa en gramos del crisol, la tapa y la porción de ensayo antes de secar.

M_3 : masa en gramos del crisol, la tapa y la porción de ensayo después del secado.

Medición de la materia volátil

La medición de la materia volátil se realiza utilizando la norma UNE-EN ISO 18123:2016 *“Determinación del contenido en materia volátil”*.

La materia volátil se determina mediante la pérdida de masa, menos la debida a la humedad, cuando se calienta el biocombustible sólido sin contacto con el aire bajo condiciones normalizadas.

Se calienta una porción de ensayo de la muestra para análisis general, prácticamente sin contacto con el aire ambiente, a $900 \pm 10^\circ\text{C}$ durante $7 \text{ min} \pm 5 \text{ s}$. El crisol (Figura 12, izquierda) debe de estar tapado para que no entre oxígeno y así evitar que la muestra arda. Se quita el soporte del crisol del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente sobre un plato de material termorresistente durante 5-10 minutos, luego se localiza el crisol en un desecador y se permite enfriar a temperatura ambiente para su posterior pesado.

El contenido de materia volátil V , de la porción de ensayo, expresado como un porcentaje de masa en base seca, se calcula mediante la ecuación (2):

$$V = \left[\frac{100(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)} - M \right] \cdot \left[\frac{100}{100 - M} \right] \quad (2)$$

donde:

M_1 : masa en gramos del crisol vacío y la tapa.

M_2 : masa en gramos del crisol, la tapa y la porción de ensayo antes de secar.

M_3 : masa en gramos del crisol, la tapa y la porción de ensayo después del secado.

M : es la humedad, como porcentaje en masa.

Medición del contenido de ceniza

La medición del contenido de ceniza se realiza utilizando la norma UNE-EN ISO 18122:2016. “Determinación del contenido de ceniza”.

El contenido en ceniza se determina mediante el cálculo a partir de la masa del residuo que permanece después de que la muestra se calienta en aire bajo condiciones controladas de tiempo, peso de la muestra y especificaciones del equipo a una temperatura controlada de $550 \pm 10^\circ\text{C}$.

Se eleva la temperatura del horno de manera uniforme hasta 250°C durante un periodo de 30 minutos a 50 minutos (equivalente a una velocidad de calentamiento de $4.5^\circ\text{C}/\text{min}$ a $7.5^\circ\text{C}/\text{min}$). Se mantiene esta temperatura durante 60 minutos para permitir que se evaporen los volátiles antes de la ignición.

Se sigue elevando la temperatura en el horno de manera uniforme hasta $550 \pm 10^\circ\text{C}$ durante un periodo de 30 minutos (equivalente a una velocidad de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$). Se mantiene esta temperatura durante al menos 120 minutos.

Se saca el crisol (Figura 12, derecha) con su contenido del horno. Se deja enfriar el crisol sobre una superficie resistente al calor entre 5-10 minutos, se pasa a un desecador con desecante y se deja enfriar a temperatura ambiente.

El contenido de ceniza en base seca, A, de la muestra expresado en porcentaje en masa en base seca se debe calcular a través de la ecuación (3).

$$A = \frac{(M_3 - M_1)}{(M_2 - M_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M} \quad (3)$$

donde:

M₁: masa en gramos del crisol vacío y la tapa.

M₂: masa en gramos del crisol, la tapa y la porción de ensayo antes de secar.

M₃: masa en gramos del crisol, la tapa y la porción de ensayo después del secado.

M: es la humedad, como porcentaje en masa.

El carbono fijo se define como la fracción que permanece después de haberse desprendido todos los compuestos volátiles, orgánicos e inorgánicos y se estima por la diferencia tras determinar el contenido de humedad, material volátil y cenizas.

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\% \text{ Humedad} + \% \text{ Volátil} + \% \text{ Cenizas})$$



Figura 12. Muestra en el crisol tras el ensayo de material volátil (izq.) y cenizas (dcha.).

2.2.3. Análisis térmico

Bajo la denominación de Análisis Térmico se agrupan una serie de técnicas en las cuales se sigue una propiedad de la muestra, en una determinada atmósfera, en función del tiempo o de la temperatura cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura controlado. La termogravimetría (TG) está basada en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando se la somete a un cambio de temperatura en una atmósfera controlada.

Para el análisis térmico se ha empleado un equipo simultáneo TG-DSC2 (METTLER-TOLEDO, Columbus, OH, EE.UU.). Los análisis se han realizado tanto en atmósfera inerte (N₂) como en atmósfera oxidativa, en el rango 25-600°C, con una rampa de calentamiento de 20°C/min. Masa de las muestras: paja cebada (N₂), 8.1780 mg; paja cebada (O_x), 8.1780 mg; paja trigo (N₂), 8.1551 mg; paja trigo (O_x), 8.0310 mg.

2.2.4. Ensayo de ignición

Se realizó el ensayo siguiendo la norma UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016. “Atmósferas explosivas. Parte 20-2: Características del material. Métodos de ensayo de polvos inflamables”.

El equipo utilizado consiste en una placa térmica, sensores de temperatura y un anillo de polvo cuyos requisitos se muestran a continuación.

La superficie caliente consistirá en una placa metálica y deberá disponer de un área de trabajo de al menos 200 mm de diámetro, y su grosor no será menor de 20 mm (Figura 13). La placa se calentará eléctricamente y su temperatura deberá controlarse por medio de un dispositivo en el que el elemento sensor es un termopar montado en la placa próximo al centro con sus uniones situadas a 1 mm ± 0.5 mm de la superficie superior y en buen contacto térmico con la placa.

Un termopar análogo deberá montarse cerca del termopar de control de una manera similar, y será conectado a un registrador de temperatura para registrar la temperatura de la superficie durante el ensayo. La superficie caliente y sus dispositivos de control deberán de satisfacer los siguientes requisitos de funcionamiento:

- a) La superficie caliente deberá ser capaz de alcanzar una temperatura máxima de 400°C sin tener colocada una capa de polvo.
- b) La temperatura de la superficie caliente deberá mantenerse constante dentro de ± 5K durante el periodo de ensayo.
- c) Cuando la superficie caliente haya alcanzado un estado estable, la temperatura a través de la superficie deberá ser uniforme dentro de ± 5K, medido a lo largo de dos diámetros en ángulo recto, por el procedimiento especificado en el anexo A de la norma. Este requisito será satisfecho a las temperaturas nominales de la superficie de 200°C y 350°C.
- d) El control de temperatura deberá ser tal que la temperatura registrada de la superficie no deberá variar en más de ±5 K durante la colocación de la capa de polvo, y deberá ser restituida dentro de ±2 K de los valores previos en los 5 minutos posteriores a la colocación de la capa de polvo.
- e) El control de temperatura y los dispositivos de medida deberán ser calibrados y deberán tener unos límites de incertidumbre de ±3 K.

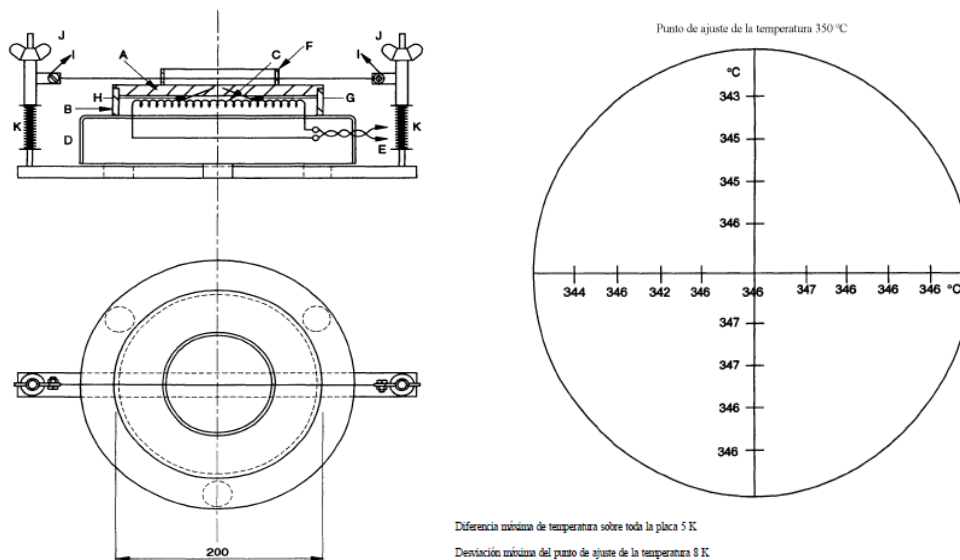


Figura 13. Esquema de la placa caliente (izq.) y distribución típica de la temperatura superficial (dcha.).

Las capas de polvo se preparan llenando la cavidad formada mediante la colocación de un anillo metálico de altura apropiada sobre la superficie caliente y rasando la capa hasta la parte superior del anillo. El anillo tendrá un diámetro interno nominal de 100 mm. El anillo se debe dejar colocado durante el ensayo. Un determinado polvo debe ser ensayado con un espesor de capa de $5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$. Se puede usar profundidades mayores de 5 mm (tal como $15 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$). El termopar utilizado para medir la temperatura de la capa de polvo será un termopar fino (0.20 mm a 0.25 mm de diámetro) de cromo-alumel o de otro material adecuado, deberá extenderse a lo largo de la superficie caliente, y paralelo a ella, a una altura entre 2 mm y 3 mm de ella. Este termopar deberá conectarse a un registrador de temperatura para determinar el comportamiento de la capa de polvo durante el ensayo.

Siguiendo el procedimiento recomendado, se considerará que la inflamación ha tenido lugar si:

- se observa una incandescencia o llama visible; o
- se mide una temperatura de 450°C ; o
- se mide una elevación de temperatura de 250 K sobre la temperatura de la placa caliente.

Si después de un periodo de 30 minutos no se percibe auto-calentamiento el ensayo deberá terminarse y repetirse a una temperatura superior. En caso de que haya inflamación o auto-calentamiento el ensayo deberá repetirse a una temperatura menor, si es necesario, prolongando el ensayo más de 30 minutos. El ensayo continúa hasta que se encuentra una temperatura que es lo suficientemente alta para causar inflamación o auto-calentamiento en la capa, pero que no sea más alta de 10 K sobre la temperatura a la que no se produce la inflamación o auto-calentamiento.

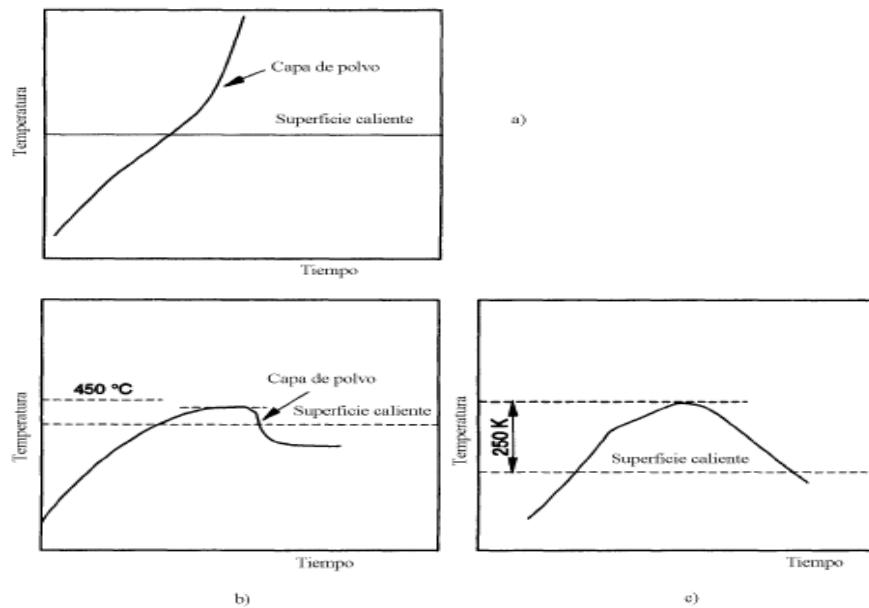


Figura 14. Curvas típicas de temperatura/tiempo de la inflamación de la capa de polvo sobre una superficie caliente.

Los ensayos de ignición se realizaron en un laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Huesca, utilizando una placa calefactora (Figura 15) fabricada por el Servicio de Instrumentación Electrónica de la Universidad de Zaragoza, conforme a los condicionantes exigidos en la norma UNE, anteriormente comentados. Además de la placa también se utilizó un registrador de temperatura desarrollado por el citado Servicio.



Figura 15. Placa calefactora y registrador de temperatura

Para el control de la temperatura de la superficie caliente se instaló un termopar con las siguientes características:

- Termopar tipo K, tolerancia clase 1.
- Disco de cobre: 12 mm de diámetro y 0.2 mm de espesor.

- Cable paralelo de hilo solido de 0.5 mm de diámetro.
- Aislamiento: fibra de vidrio.
- Longitud de cable de 2 o 5 metros.
- Rango de temperatura de -10 a 480°C.

El termopar utilizado para medir la capa de polvo presenta las siguientes características:

- Termopar tipo K de aislamiento mineral y unión aislada.
- Vaina de acero inoxidable AISI321 Diámetro 0.5 mm y longitud 250 mm.
- Temperatura máxima de la vaina 800°C.
- Casquillo inoxidable diámetro 6.3 x 31mm, T^a max. 85°C.
- Cable de extensión perfluoroalcóxido (PFA), T^a max. 250°C.

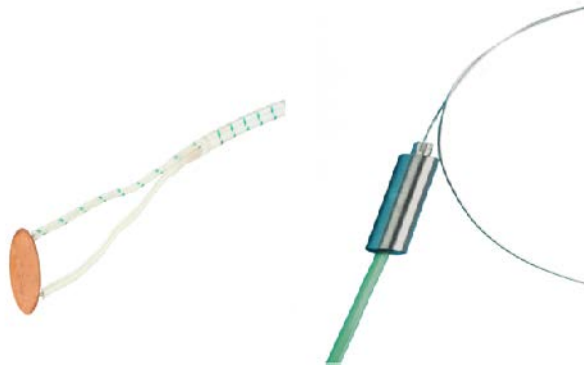


Figura 16. Termopar tipo K utilizado para la superficie caliente (izq.) y para la capa de polvo (dcha.).

La fabricación de los anillos se realizó conforme la norma UNE. En este ensayo se utilizaron tres espesores de anillo (5 mm, 10 mm y 15 mm), además para cada espesor se utilizaron tres tamaños de partícula (<250 μm , 250 μm y 500 μm). El procedimiento de trabajo se realizó conforme a la norma UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.



Figura 17. Anillos utilizados durante los ensayos de ignición.

En la Figura 18 se muestra el equipo de trabajo completo, que consta de la placa calefactora colocada sobre una superficie de ladrillo macizo para aislar el calor, los termopares sujetos con un soporte de pinzas. En la parte inferior, se encuentra el registrador de temperatura, en el cual se conecta la placa y los termopares. Este registrador a través de un cable USB se conecta al ordenador, que tiene instalado el software para poder controlar las temperaturas de todos los elementos.

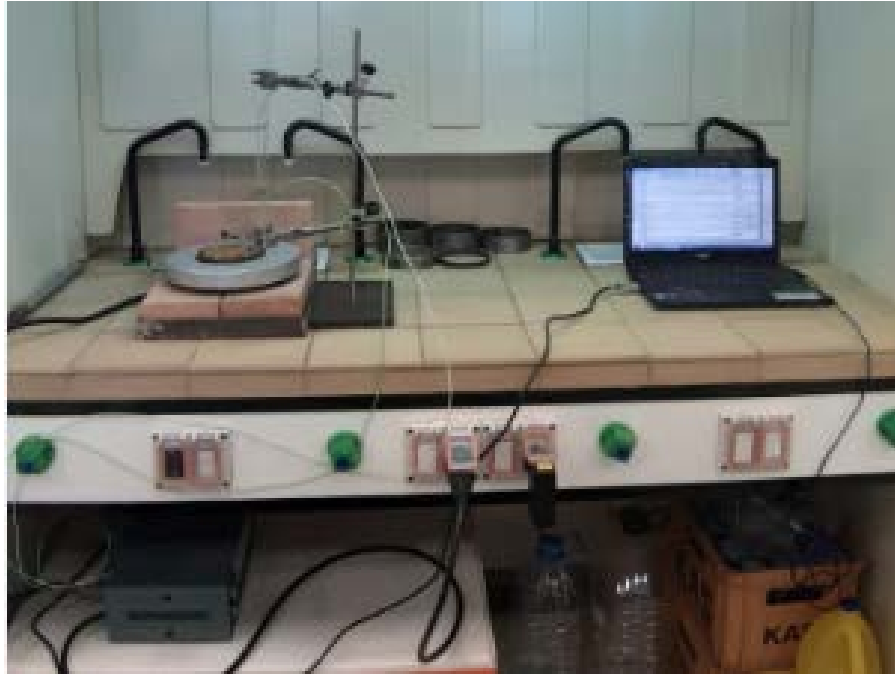


Figura 18. Equipo completo utilizado en los ensayos de ignición.

2.3. Monitorización de cosechadoras en campo

A lo largo de las campañas de cosecha 2018 y 2019, se han monitorizado 9 máquinas (3 máquinas en 2018 y 6 máquinas en 2019). Se han instalado sondas de temperatura (termopares tipo K) en diferentes zonas de cada máquina, además de una sonda de temperatura/humedad ambiental en el exterior, modelo HOBO Pro v2 Ext Temp/RH (Onset Computer Corp., Bourne, MA, EE.UU.).

Los termopares tipo K instalados (Figura 19) presentaron las siguientes características:

- Vaina de acero inoxidable AISI 310. Diámetro 1.5 mm y longitud 100 mm.
- Unión aislada. Aislamiento mineral.
- Temperatura máxima en la punta 1100°C.
- Casquillo inoxidable. Diámetro de 6.3 mm y longitud de 29 mm.
- Temperatura máxima del casquillo: 235°C.
- Cable aislado con resina perfluoroalcóxido (PFA) de 2×0.5 mm.
- Temperatura máxima del cable: 250°C.

Las sondas de temperatura, con tres o cuatro por máquina, se conectaron a un *datalogger* portátil (Data Logger THERMOMETER SE-520; TC-Direct, Madrid), colocado en la cabina de las máquinas. El *datalogger* (Figura 19) presentó las siguientes características:

- Entrada multicanal (4 canales) para termopares tipo K, T, J, N, E, R o S mediante un conector mini macho.
- Hasta 32000 lecturas por canal.
- Intervalo de registro configurable desde 1 segundo a 23 horas, 59 minutos y 59 segundos.
- Valor de la temperatura en °C, °F y K.

- Comunicación por Bluetooth o USB a través de un software ejecutable en sistema operativo Windows.
- Resolución de 0.1 °C.
- Precisión $\pm 0.1\%$ de la lectura $+0.7^\circ\text{C}$.
- Alimentación mediante 4 baterías tamaño AAA.



Figura 19. Izquierda: Indicador/datalogger portátil. Derecha: termopar tipo K de aislamiento mineral.

En relación con la sonda-*datalogger* para temperatura y humedad exterior (HOBOPRO v2 Ext Temp/RH), se trata de un dispositivo programable que toma datos de temperatura ambiente y humedad relativa en el intervalo de tiempo deseado por el usuario, pudiendo programarse mediante un puerto USB-óptico con ordenador con el *software* HOBOWare 3.0, que también permite la descarga de los datos registrados.

Características y especificaciones del aparato:

- Puerto USB óptico para transferir los datos de forma rápida y segura.
- Memoria: 42000 observaciones.
- Intervalo de medida: 1 segundo a 18 horas. Intervalos fijos o múltiples de registro de datos, con hasta 8 intervalos de medida y duraciones definidas por el usuario.
- Vida de la batería: 3 años. Batería de Litio 3.6 Volt 1/2 AA intercambiable.

Temperatura:

- Rango de medida: -40 a 100°C .
- Precisión: $\pm 0.2^\circ\text{C}$ en el rango de 0 a 50°C .
- Resolución (12-bit): 0.02°C a 25°C .

Humedad relativa:

- Rango de medida: 0 a 100% HR.
- Precisión: \pm porcentaje de 10 a 90% .
- Resolución (12-bit): 0.03% HR.



Figura 20. Software Hoboware Pro y Puerto USB óptico. Sonda de temperatura y humedad (Hobo Pro v2)

Como se ha comentado anteriormente, se monitorizaron 9 máquinas, que presentaron las siguientes características:

- Máquina #1:
 - Pertenece a una empresa de servicios. Más de 500 ha cosechadas/año.
 - Máquina estrenada en la campaña 2018. Sin horas de trabajo acumulado.
 - Anchura de corte de 7.70 m.
 - Escape de gases equipado con sistema de adición de urea.
 - Sistema de refrigeración “*Dynamic Cooling*”.
 - Potencia de 320 kW (435 CV).
- Máquina #2:
 - Pertenece a una empresa de servicios. Más de 500 ha cosechadas/año.
 - Máquina antigua. Con aproximadamente 2300 horas de trabajo acumuladas.
 - Anchura de corte 7.70 m.
 - Escape de gases equipado con filtro de partículas.
 - Sistema de refrigeración con ventilación lateral.
 - Potencia de 320 kW (435 CV).
- Máquina #3:
 - Pertenece a un particular. Alrededor de 200 ha cosechadas/año.
 - Máquina antigua. Con aproximadamente 3200 horas de trabajo acumuladas.
 - Anchura de corte de 5.10 m.
 - Escape libre sin tratamiento.
 - Potencia de 119 kW (160 CV).
- Máquina #4:
 - Pertenece a una empresa de servicios. Más de 500 ha cosechadas/año.
 - Máquina de 8 años. Con aproximadamente 4000 horas de trabajo acumuladas.
 - Anchura de corte de 6.10 m.
 - Escape libre sin tratamiento.
 - Potencia de 184 kW (250 CV)

- Máquina #5:
 - Pertenece a una empresa de servicios. Más de 500 ha cosechadas/año.
 - Máquina de 16 años. Con aproximadamente 10000 horas de trabajo acumuladas.
 - Anchura de corte de 5.20 m.
 - Escape libre sin tratamiento.
 - Potencia de 132 kW (180 CV).
- Máquina #6:
 - Pertenece a un particular. Más de 500 ha cosechadas/año.
 - Máquina de 3 años. Con aproximadamente 600 horas de trabajo acumuladas.
 - Anchura de corte de 6.70 m.
 - Escape de gases equipado con filtro de partículas y de urea.
 - Escape de gases equipado con filtro de partículas.
 - Sistema de refrigeración con ventilación lateral.
 - Potencia de 202 kW (275 CV).
- Máquina #7:
 - Pertenece a un particular. Aproximadamente 350 ha cosechadas/año.
 - Máquina de 10 años. Con más de 3000 horas de trabajo acumuladas.
 - Anchura de corte de 6 m.
 - Recirculación de los gases sin filtro.
 - Sistema de refrigeración con ventilación lateral.
 - Potencia de 164 kW (220 CV).
- Máquina #8:
 - Pertenece a una empresa de servicios. Más de 500 ha cosechadas/año.
 - Máquina estrenada en la campaña 2019. Sin horas de trabajo acumulado.
 - Anchura de corte de 7 m.
 - Escape de gases equipado con filtro de partículas y de urea.
 - Sistema de refrigeración con ventilación lateral.
 - Potencia de 294 kW (400 CV).
- Máquina #9:
 - Máquina de rotores.
 - Pertenece a un particular. Más de 500 ha cosechadas/año
 - Máquina importada en el año 2006. Con aproximadamente 3000 horas de trabajo acumuladas.
 - Anchura de corte de 7 m. Siendo el corte plegable.
 - Escape libre sin tratamiento.
 - Sistema de refrigeración con ventilación lateral.
 - Potencia de 309 kW (420 CV).

La elección de las máquinas se basó en la elección de distintas marcas que presentasen diferentes diseños en la fabricación, principalmente ligados al sistema de tratamiento de los gases de combustión. Además, se buscó que las máquinas tuviesen diferentes características técnicas (antigüedad, potencia, hectáreas cosechadas, etc.), como se aprecia en los párrafos anteriores. En definitiva, las máquinas fueron seleccionadas desde la perspectiva de tener una variedad de máquinas que podrían ser representativas del parque de cosechadoras en Aragón.

En la Tabla 1 a modo de síntesis, se resumen las características más importantes de las cosechadoras monitorizadas.

Tabla 1. Características de las cosechadoras monitorizadas en la campaña 2018 y 2019

Máquinas	Potencia (CV/KW)	Antigüedad (años)	Anchura de corte (m)	ha/año	Características técnicas	Periodo monitorización (dd/mm/aa)
Máquina #1	435/320	0	7.7	>500	SCR + EGR sin filtro	15/06/12-16/07/18
Máquina #2	435/320	2	7.7	>500	EGR DPF	15/06/12-16/07/18
Máquina #3	160/119	16	5.1	200	Escape sin tratamiento	15/06/12-16/07/18
Máquina #4	250/184	8	6.1	>500	Escape sin tratamiento	18/06/19-01/07/19
Máquina #5	180/132	16	5.2	>500	Escape sin tratamiento	18/06/19-01/07/19
Máquina #6	275/202	3	6.7	>500	EGR + DPF	13/06/19-06/07/19
Máquina #7	220/164	10	6.0	350	EGR sin filtro	22/06/19-04/07/19
Máquina #8	400/294	0	7.0	>500	SCR + EGR + DPF	03/07/19-19/07/19
Máquina #9	420/309	13	7.0	>500	Escape sin tratamiento	04/07/19-19/07/19

* SCR, EGR y DPF. Sistema de reducción catalítica selectiva, recirculación de gases de escape y filtro de partículas diésel, respectivamente.

Los puntos seleccionados para colocar las sondas de temperatura se eligieron en función de las zonas de riesgo detectadas en el estudio inicial y de la viabilidad de colocar las sondas de temperatura durante la cosecha. La colocación de los sensores se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Localización de las sondas de temperatura en las 9 cosechadoras

Localización sonda	COSECHADORAS					
	1	2	3	4	5	6-7-8-9
Colector de escape	X		X	X	X	X
SCR	X					
DPF		X				
Bloque del motor		X	X	X	X	X
Caja de cambios	X	X				
Salida de transmisión del motor	X	X	X	X		X
Salida del sistema hidrostático				X	X	
Culata del motor					X	

* SCR y DPF. Sistema de reducción catalítica selectiva y filtro de partículas diésel, respectivamente.



Figura 21. Detalle termopar tipo K situado en el colector de escape (izqda.). Colocación sonda HOBO en el exterior de la máquina (dcha.).

Siguiendo las recomendaciones de los servicios técnicos de los fabricantes de las máquinas, no se instalaron termopares tipo K en elementos en movimiento, por lo que no pudieron monitorizar zonas móviles de las máquinas (barra de corte, rodamientos, frenos, etc.). No obstante, se realizó una prueba con una barra de corte de cosechadora en mal estado y con muy poco mantenimiento, con el corte funcionando a 700 rpm y la máquina estacionada. Para ello se colocaron tres termopares en diferentes zonas de la barra de corte (en un diente de una cuchilla con rozamiento, en un diente de una cuchilla en estado normal y en una chapa del corte) para la monitorización de la evolución de la temperatura. En la Figura 22 se muestra una de las sondas instaladas en la barra de corte.



Figura 22. Detalle de la sonda de temperatura instalada en la barra de corte.

Las medidas relativas al ensayo de la barra de corte se complementaron con las obtenidas con una cámara termográfica Fluke Ti200 (Figura 23). Esta cámara está equipada con el sistema de autoenfoco *LaserSharp*, y utiliza una lente láser para calcular la distancia con respecto al objetivo antes de enfocar.

Características y especificaciones de la cámara Fluke Ti200:

- Rango de Temperatura: -20 a 650°C.
- Sensibilidad térmica: $\leq 0.075^{\circ}\text{C}$ a 30°C temp. objetivo.
- Cámara de luz visible: 5.0 megapíxeles.
- Duración batería: 2.5 horas.
- Temperatura de trabajo: -10 a 50°C.
- Humedad relativa: 10-95% sin condensación.
- Tamaño: 277 × 122 × 167 mm.
- Peso aproximado: 1.04 kg.



Figura 23. Cámara de infrarrojos Fluke Ti 200.

En relación con la recogida de datos de las sondas (termopares tipo K), todas las sondas se programaron de forma sincronizada para que recogieran datos cada 10 minutos durante las 24 horas del día. Los datos de las sondas se extrajeron de los *datalogger* con una periodicidad semanal. Posteriormente se realizó el pre-procesado de los datos, consistente en la eliminación de los datos de temperatura obtenidos durante el tiempo que no trabajaba la máquina. Por último, se analizaron estadísticamente las diferencias de temperatura entre las diferentes sondas y zonas de las máquinas utilizando el software SPSS v.18 (IBM, Chicago, IL, EE.UU.).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultado encuestas

En total se obtuvieron 275 respuestas. En la Tabla 3 se muestra el resultado global de la encuesta, referente al número de máquinas y al número de incendios sufridos.

Tabla 3. Resultados obtenidos en la encuesta.

Número de encuestas respondidas	275
Propietario de cosechadoras	173
No es propietario de cosechadoras	102
Número total de cosechadoras	221
1 cosechadora	139 propietarios
2 cosechadoras	24 propietarios
3 cosechadoras	6 propietarios
> 3 cosechadoras	4 propietarios
Encuestas que no han sufrido incendios	200
Encuestas que han sufrido incendios	75
Encuestas que han sufrido incendios y no son propietarios	18
Encuestas que han sufrido incendios y son propietarios	57
Número total de incendios	111
1 incendios	23 encuestas
2 incendios	21 encuestas
3 incendios	6 encuestas
>3 incendios	7 encuestas
Número total de máquinas	84
1 cosechadora	40 respuestas
2 cosechadoras	10 respuestas
3 cosechadoras	4 respuestas
>3 cosechadoras	3 respuestas

3.1.1. Relaciones entre variables

En la Figura 24 se muestra la relación entre la variable hectáreas anuales con respecto a la potencia, antigüedad y hectáreas acumuladas, partiendo de la hipótesis de que las máquinas que más hectáreas cosechan al año estarán más expuestas y podrían tener más probabilidades de producir un incendio. Se observa que las máquinas que más hectáreas trabajan al año presentan unos mayores niveles de potencia, una menor antigüedad y un mayor número de hectáreas totales acumuladas (mayor desgaste).

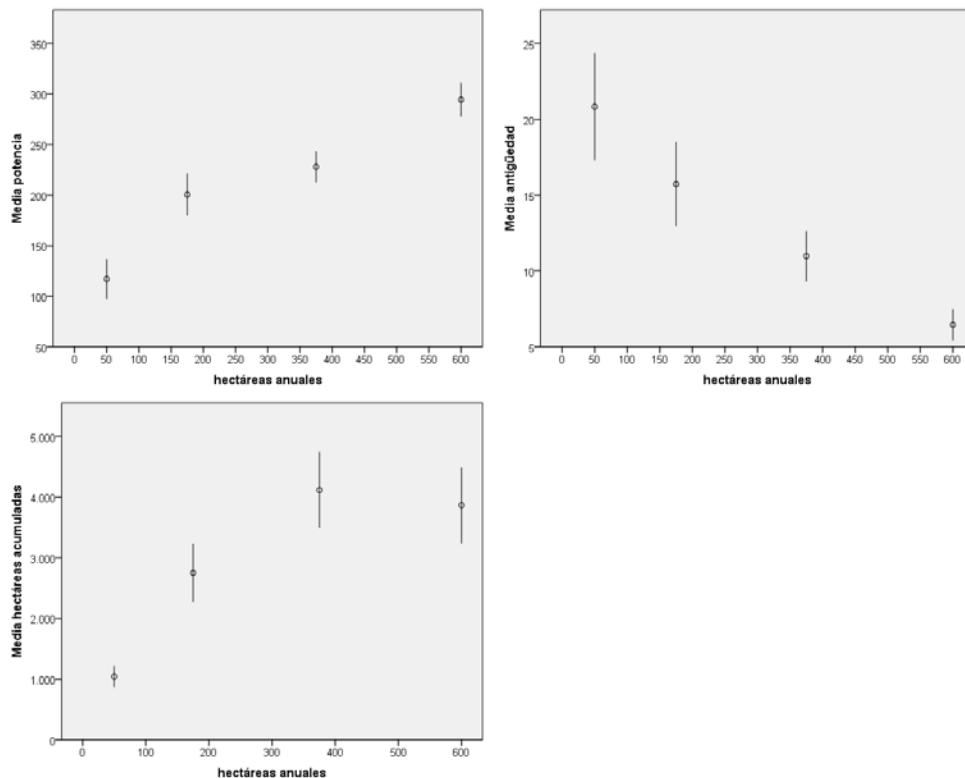


Figura 24. Relación entre las hectáreas anuales con la potencia, la antigüedad y las hectáreas acumuladas. Se muestran los valores medios \pm las desviaciones estándar.

3.1.2. Relación entre variables e incendio

A partir de las tablas de contingencia de cada variable (anexo 1) con respecto al incendio, se obtuvo que la antigüedad ($\chi^2=0.673$), la potencia ($\chi^2=0.723$) y las hectáreas anuales ($\chi^2=0.766$) no mostraron una relación estadísticamente significativa con los incendios. Ahora bien, para la variable hectáreas acumuladas se obtuvo un $\chi^2=0.055$, muy próximo al nivel de significación (0.05). En la Figura 25 se observan porcentajes de incendio muy similares para las máquinas que han trabajado hasta 6000 ha, pero, una vez superado este umbral, el porcentaje de incendio sería más elevado (60%).

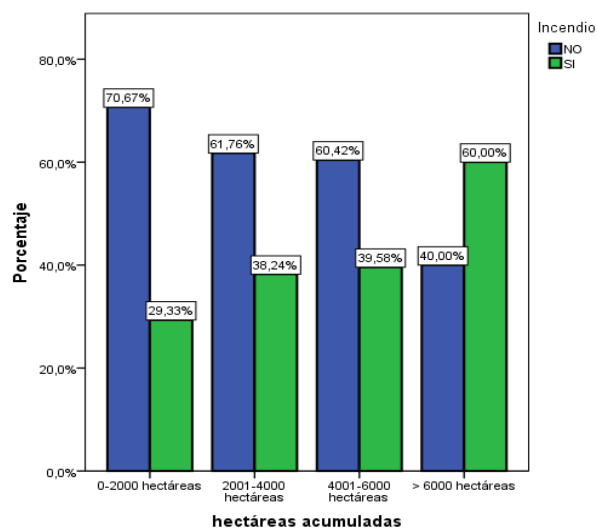


Figura 25. Probabilidad de incendio en función de las hectáreas acumuladas.

Al ser las hectáreas totales acumuladas la única variable que guarda relación con el riesgo de incendio se procedió a un análisis más detallado de posibles relaciones de esta variable con el resto de las variables. No se detectó una relación significativa con el uso de picador ($\chi^2=0.282$), pero sí con la variable potencia ($\chi^2=0.012$), aparte de con las variables antigüedad ($\chi^2=0.000$) y hectáreas anuales ($\chi^2=0.000$) de las que depende. En la Figura 26 se muestran las relaciones entre las tres variables. El perfil de máquinas con más de 6000 has acumuladas y que presentaron una mayor probabilidad de incendio correspondería a máquinas con una potencia media de 286 CV, una antigüedad media de 15 años y que trabajan una media de 548 ha/año.

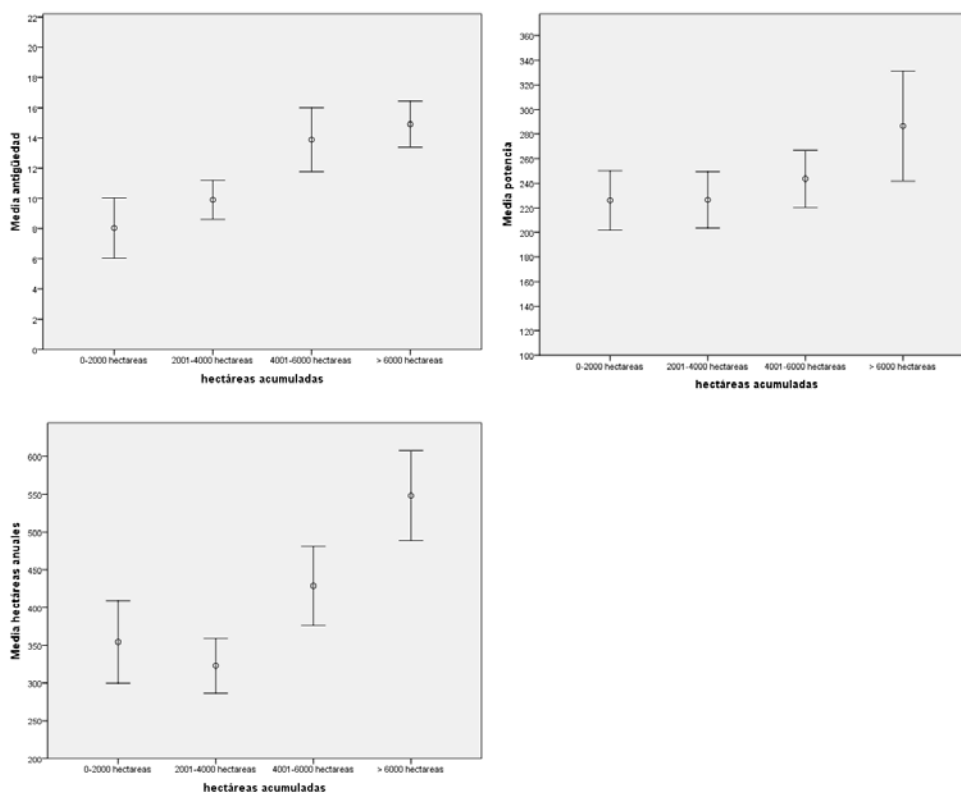


Figura 26. Relación entre las hectáreas acumuladas con la potencia, la antigüedad y las hectáreas anuales. Se muestran los valores medios \pm las desviaciones estándar.

3.1.3. Determinación de las cosechadoras en uso con mayor riesgo de incendio

Se ha analizado el parque de cosechadoras en España y en Aragón, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4. Estimación del número de cosechadoras en España y Aragón

	Motivo de alta	Censo vivo	Censo en uso
España	Máquina nueva	7510	4414
	Usada de importación	1144	820
	Cambio de titular	18659	9562
Aragón	Máquina nueva	1310	700
	Usada de importación	205	147
	Cambio de titular	3650	1520

De cara a este proyecto, se ha intentado determinar el número de máquinas en uso, es decir, las que están trabajando de forma real en campo. En España, aplicando los criterios especificados en el apartado de materiales y métodos, se han obtenido 14796 máquinas en uso, frente a las 2367 máquinas que hay en Aragón, un 16% del total de España.

En la Figura 27 se muestra un histograma de las máquinas en uso en función de su potencia, tanto para España como para Aragón (comparar con Figura 5 para el total de máquinas censadas).

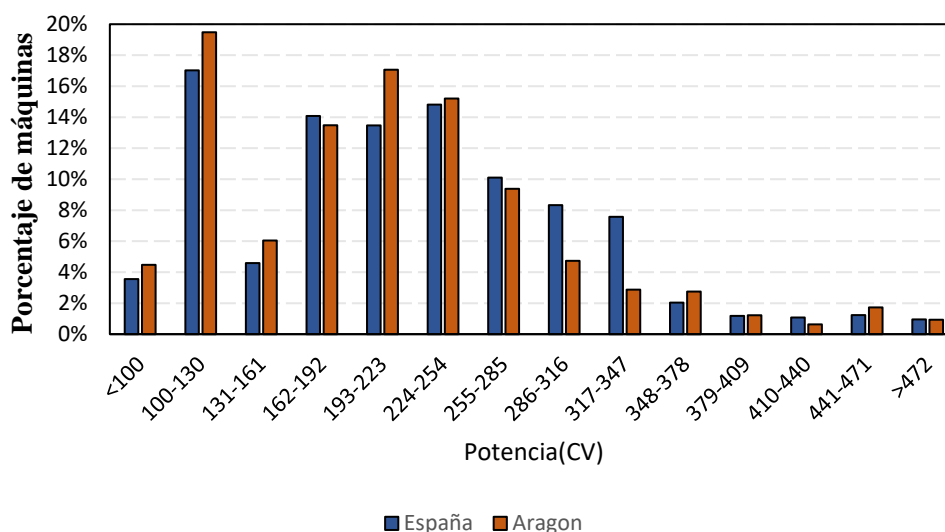


Figura 27. Porcentaje de cosechadoras en uso en función de su potencia en el periodo 1952-2017. (Elaboración propia a partir de datos del ROMA).

Posteriormente, se han determinado las máquinas en uso que mayor riesgo tienen de incendio, para ello se han seleccionado las máquinas con 15 años de antigüedad y con una potencia entre 251-300CV (intervalo de la encuesta en el que se encuentra los 284 CV). En la Tabla 5 se muestran los resultados tanto para España como para Aragón.

Tabla 5. Cosechadoras con mayor riesgo de incendio, a partir de los datos obtenidos en la encuesta.

	España	Aragón
Máquinas en uso	14796	2367
Máquinas con mayor riesgo	1637	244
% del total de máquinas en uso	11%	10%

Observamos que el porcentaje de máquinas con mayor riesgo de incendio es similar para España (11%) y Aragón (10%), existiendo 1637 y 244 máquinas respectivamente.

3.1.4. Determinación de las zonas de origen de incendios

A través de una tabla de contingencia, se estudió la relación entre el uso del picador con el origen de incendio. Se obtuvo un valor de $\chi^2=0.159$, por lo que el uso del picador de paja no favoreció, en base a la información disponible, el origen del incendio en cualquier área específica de la máquina.

En la Figura 28 se muestran las zonas de origen de incendio según los datos de la encuesta realizada en este estudio. Se han obtenido un total de 91 respuestas. La zona donde más incendios se originan es en la zona del motor (32%), seguido de la barra de corte (31%). Otras zonas destacables en el origen de incendios son los rodamientos y correas (18%) y causas eléctricas (9%). El 10% restante pertenecen a otras zonas de la máquina (alternador, frenos, picador, etc.).

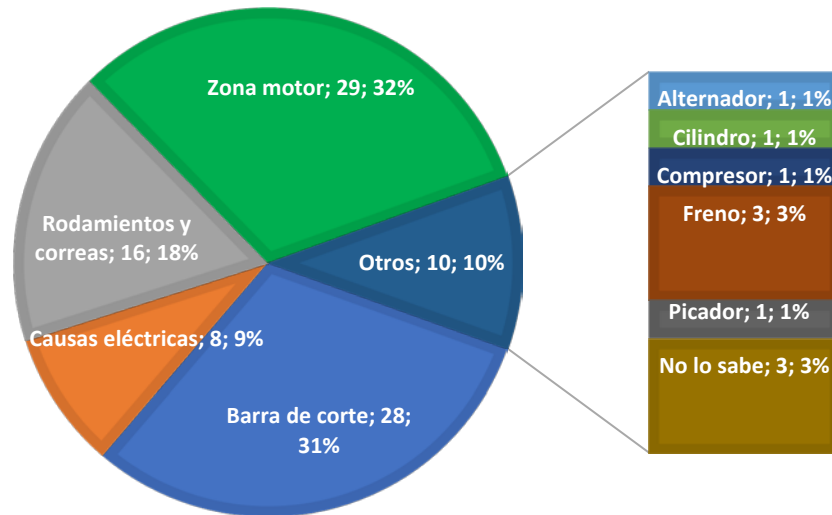


Figura 28. Zonas de origen de incendios a través de los datos obtenidos de la encuesta.

En la Tabla 6 se muestran los datos facilitados por una compañía de seguros de siniestros en cosechadoras a nivel nacional para la anualidad 2017, así como otros datos procedentes de diferentes referencias bibliográficas. En todos los casos, incluidos la encuesta, se observa que la zona donde más incendios se originan es en la zona del motor, aunque las cifras difieren entre las distintas citas bibliográficas (~33% hasta ~45%). Las causas eléctricas representan la segunda causa más importante de incendio en dos fuentes bibliográficas, siendo en la restante los rodamientos y correas. Los rodamientos y correas (~22%) representan un porcentaje muy similar entre la encuesta y las fuentes bibliográficas. Con respecto a la barra de corte, según la bibliografía revisada, tiene poca importancia en el origen de incendio (~9%), difiriendo en el resultado de la encuesta, ya que es la segunda causa más importante con un 31%.

Tabla 6. Comparación de las principales zonas de origen de incendios en cosechadoras

Zona	Compañía aseguradora	Quick, 2010	Shutske & Field, 1988	Shutske J. M. et al., 1990
Barra de corte	11.11%	6.49%	-	3.00%
Causas eléctricas	25.93%	12.99%	34.00%	14.00%
Zona del motor	33.33%	45.45%	40.00%	33.00%
Otras zonas	7.41%	12.97%	8.00%	28.00%
Rodamientos y correas	22.22%	22.10%	18.00%	22.00%

3.2. Estudio del material comburente

3.2.1. Granulometría

En la Tabla 7 se muestra la caracterización granulométrica del residuo de las diferentes partes de la máquina.

Tabla 7. Caracterización granulométrica del residuo de las distintas zonas de la máquina.

Máquina	Picador	Zonas	Peso(g)	>4mm	2mm	1mm	500µm	250µm	<250µm
Maq.1	Si	Barra de corte	275.08	25.83%	10.88%	28.10%	14.05%	9.50%	11.64%
		Eje rueda delantera derecha	123.18	9.30%	16.51%	25.86%	23.79%	14.79%	9.76%
Maq.2	Si	Barra de corte	187.06	73.79%	13.54%	4.19%	3.21%	2.58%	2.69%
		Eje rueda delantera derecha	279.55	2.54%	28.74%	30.56%	14.53%	10.80%	12.83%
		Picador	149.12	4.23%	8.32%	18.10%	18.68%	19.50%	31.16%
Maq.3	Si	Picador	166.95	9.57%	12.17%	16.52%	18.03%	13.27%	30.45%
Maq.4	No	Eje rueda trasera derecha	48.08	8.03%	32.01%	20.63%	19.51%	11.67%	8.15%
		Envocadura corte	387.03	5.00%	33.08%	12.09%	10.21%	9.83%	29.79%
		Eje rueda delantera derecha	518.31	1.10%	24.47%	29.61%	12.39%	8.85%	23.59%
Maq.5	No	Picador	285.69	20.84%	20.35%	15.41%	13.45%	9.97%	19.99%

Analizando las zonas, se observa una tendencia de acumulación de tamaños mayores (>4 mm a 1 mm) en la barra de corte, representando más del 60% del peso total. En el eje de las ruedas, tanto de las traseras como de las delanteras, el tamaño predominante es de 2 mm a 500 µm, acumulando más del 65% del peso total en todos los casos. Por último en la zona del picador, se observa una gran diferencia entre las máquinas que picaban la paja y la que no la picaba (Figura 29). En la máquina 2 y 3 que picaban la paja aproximadamente el 35% representan los tamaños de partícula entre 4 mm y 1 mm, siendo el 31% del total polvo (<250 µm). En la máquina 5 que dejaba la paja, aproximadamente el 60% representan partículas entre 4 mm y 1 mm, siendo el polvo solamente un 20% del total.

El residuo presente en la zona del motor se mantuvo siempre por debajo de 250 µm, siendo su cantidad tan pequeña que no permitió un tamizado específico.

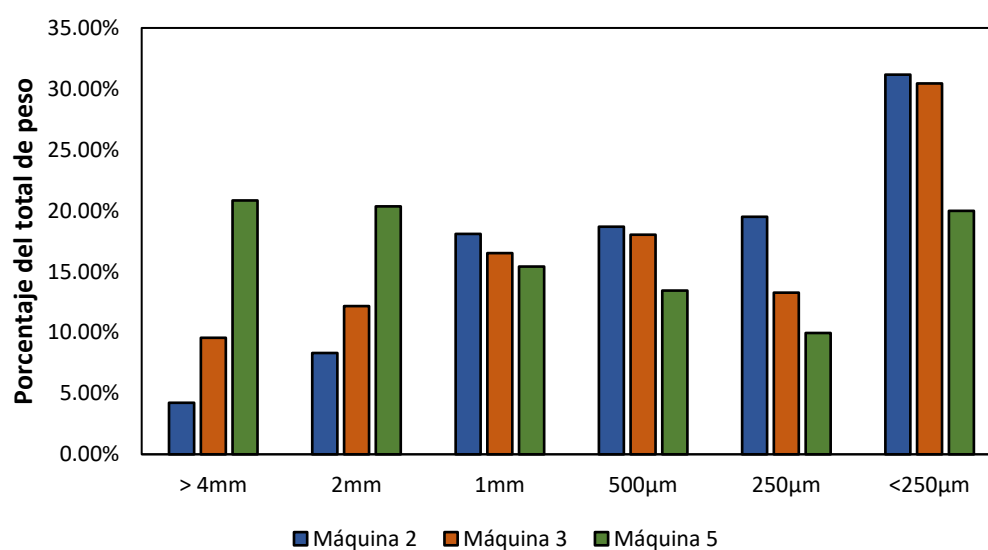


Figura 29. Comparación de la caracterización granulométrica en la zona del picador.

3.2.2. Análisis inmediato

La Tabla 8 representa las características del análisis inmediato de la cebada y el trigo.

Tabla 8. Análisis inmediato del residuo. b.s.: base seca

Residuo	Humedad	Volátiles (% b.s.)	Cenizas (% b.s.)	Carbono fijo (% b.s.)
Cebada	8.26	78.88	5.80	15.33
Trigo	8.13	77.89	7.50	14.62

Representando en un diagrama ternario los valores proporcionados del análisis inmediato se obtiene la Figura 30, en la que quedan representados los dos tipos de residuo (cebada y trigo) con valores muy similares para el contenido de volátiles, cenizas y carbono fijo.

Nuestros resultados difieren tanto en volátiles, cenizas y carbono fijo. Ibarra Ballesteros & Rueda Ordoñez, (2017) obtuvieron unos valores para el trigo de 71.78% volátiles, 9.27% cenizas y 18.95% carbono fijo. En cebada, 82.41% volátiles, 4.30% cenizas y 13.29% carbono fijo. Una causa de esta diferencia puede ser debida a que en la bibliografía, se analiza la paja como biomasa para aprovechamiento energético, frente a este trabajo, en el que se ha trabajado con un residuo agrícola almacenado en cosechadora en partículas mas pequeñas proveniente del cultivo de cebada o trigo, pero que no tiene nada que ver con la paja con finalidad de aprovechamiento energético.

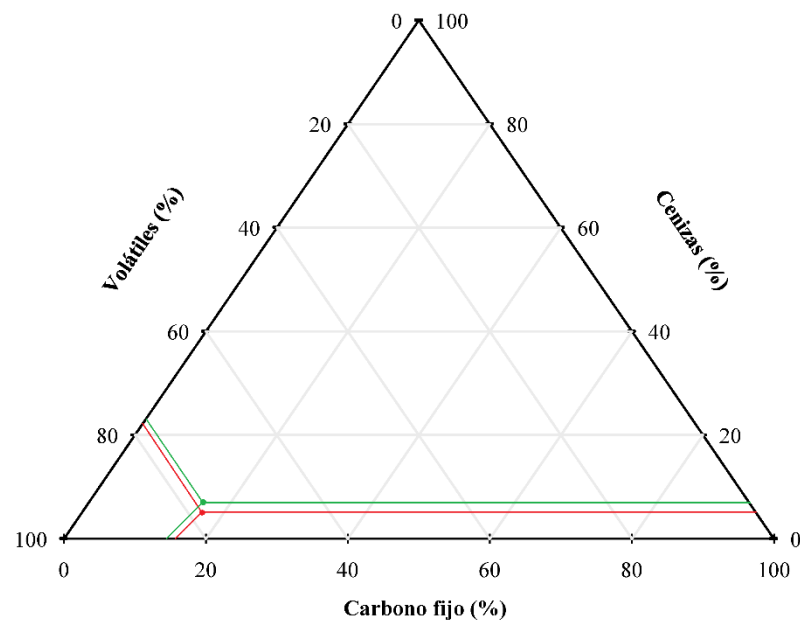


Figura 30. Diagrama ternario del análisis inmediato. Muestra de cebada (Rojo) y muestra de trigo (Verde).

3.2.3. Análisis térmico

La Figura 31 presenta las curvas TG, DTG y DSC relativas a las dos muestras, en atmósfera inerte y en atmósfera oxidativa. En la curva de TG podemos observar varias etapas de pérdida de peso. La primera, entre temperatura ambiente y 150°C, está relacionada con la eliminación de humedad. En la segunda etapa (150°C-350°C), dependiendo de la atmósfera, puede colatilizarse hasta un 50% de la masa. Corresponde a una pirólisis oxidativa y los volátiles liberados proceden de la descomposición térmica de hemicelulosa, celulosa y parte de lignina. Por encima de 350°C tiene lugar la verdadera combustión, en la que restos de lignina y una mezcla de sólidos carbonáceos (con un pequeño componente mineral) sufren combustión moderada (*smoldering*) hasta aproximadamente 500°C. A temperaturas de 600°C, la pérdida de masa es del 60% en atmósfera de N₂ y entre el 70 y el 80% en atmósfera de O₂. Los máximos de pérdida de masa son sensibilizados en las curvas DTG con picos a 72-73.5°C, 300-309°C y 456-469°C, según condiciones de trabajo.

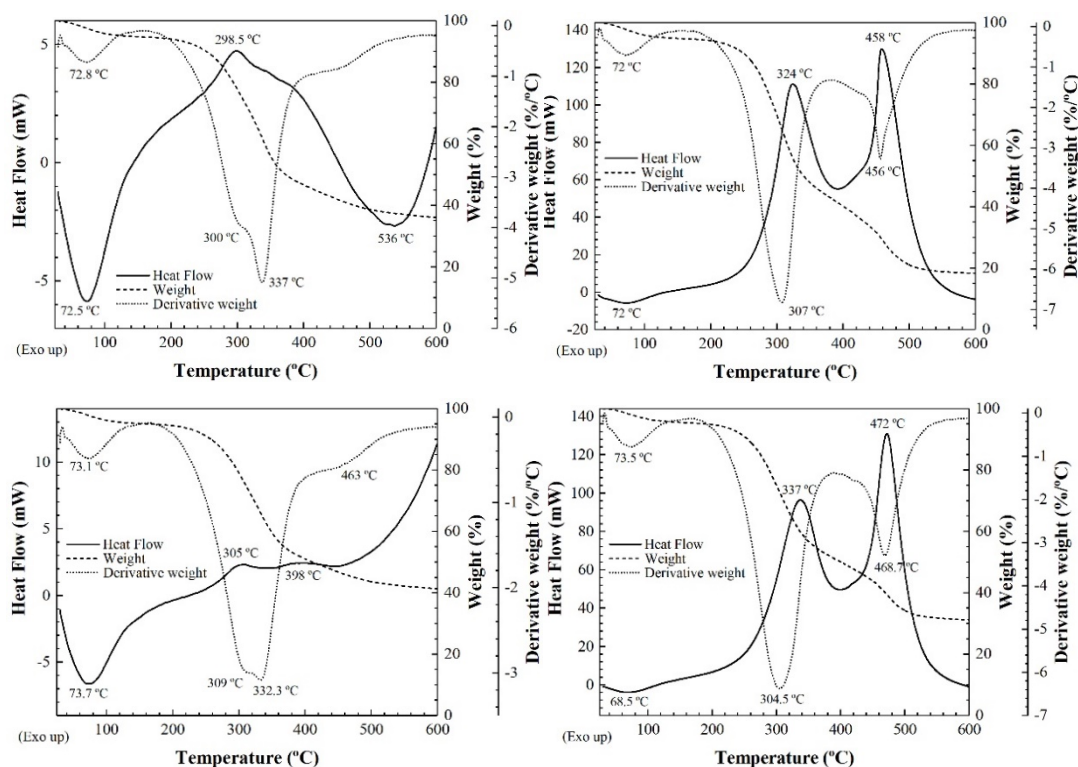


Figura 31. Curvas de descomposición térmica de la paja de trigo (*arriba*) y cebada (*abajo*) en atmósfera de nitrógeno (*izquierda*) u oxidativa (*derecha*). En el eje izquierdo se representa la escala para la curva de DSC (exo up); en el primer eje derecho, la curva TG; y en el segundo eje derecha, la curva DTG.

Las curvas DSC en atmósfera de O₂ se caracterizan por la presencia de dos endotérmicos entre 300°C y 500°C, correspondientes a las reacciones de descomposición de hemicelulosa y celulosa, con máximos a 324°C y 458°C para paja de trigo y a 337°C y 472°C para paja de cebada. Las temperaturas de pico a 324°C y 337°C corresponden a la pirólisis oxidativa y los de 458°C y 472°C a combustión.

Se estima que la temperatura más baja a la que puede producirse una ignición es la de 150°C, un proceso perfectamente declarado a 307°C al que está asociado un calor de reacción próximo a 900 kJ/kg (entre 350°C y 500°C alcanza un valor de 945 kJ/kg).

La velocidad de reacción de una reacción de oxidación que puede dar lugar a ignición espontánea puede ser expresada como el producto de tres factores: la concentración de material combustible, la de oxígeno disponible, y el término $A(1/e^{E/RT})$, en el que A es una constante para cada reacción; E, la energía de activación; R, la constante de los gases; y T, la temperatura absoluta:

$$R_r = C_{\text{combustible}} \cdot C_{O_2} \cdot A(1/e^{E/RT})$$

En la Tabla 9 se muestran las características del análisis elemental para las muestras de trigo y cebada.

Tabla 9. Resultados del análisis térmico del residuo.

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Trigo	48.5	5.5	45.8	0.3
Cebada	45.7	6.1	47.8	0.4

3.2.4. Ensayo de ignición

Los resultados de las pruebas de autoignición en placa caliente se muestran en la Tabla 10. Se observó una disminución en la temperatura de ignición cuando el tamaño de partícula del residuo era menor, de acuerdo con los hallazgos de Polin et al.,(2013), para muestras de campo de polvo de girasol en cosechadoras. Del mismo modo, para el mismo tamaño de partícula, la temperatura de ignición disminuyó a medida que aumentaba el espesor de la muestra. La temperatura mínima de ignición fue de 250°C, asociada con el residuo de 250 µm y un espesor de 15 mm. Estos resultados fueron concordantes con los obtenidos por Fernandez-Anez & Garcia-Torrent (2019), que informó un valor de 250°C para un espesor de residuo de 50 mm.

Debe tenerse en cuenta que en las cosechadoras las partículas de residuos muestran una distribución del tamaño en la que los tamaños pequeños constituyen un alto porcentaje de peso. Polin J. et al., (2014), trabajando con residuos de girasol, obtuvo un 78% de partículas de residuos por debajo de 750 µm. En el residuo presentado en este trabajo, el 66% de las partículas de residuos recogidas de las cinco cosechadoras fueron inferiores a 1 mm.

Tabla 10. Resultados de las pruebas de autoinflamación de placas calientes de capas de residuo de trigo según UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.

Espesor	Tamaño	Temperatura de la superficie (°C)	Resultado de la prueba	Tiempo de ignición (min)
5 mm	< 250 μm	290	Ignición	5
		280	Sin ignición	30
		280	Sin ignición	30
	250 μm	320	Ignición	3
		310	Sin ignición	30
	500 μm	340	Ignición	3
		330	Sin ignición	30
	1 mm	360	Ignición	2
		350	Sin ignición	30
10 mm	< 250 μm	280	Ignición	7
		270	Ignición	10
		260	Sin ignición	45
	250 μm	300	Ignición	5
		290	Ignición	6
		280	Sin ignición	45
	500 μm	320	Ignición	3
		310	Ignición	5
		300	Ignición	6
		290	Sin ignición	45
15 mm	< 250 μm	260	Ignición	13
		250	Ignición	28
		240	Sin ignición	120
	250 μm	280	Ignición	11
		270	Ignición	12
		260	Ignición	17
		250	Sin ignición	60
	500 μm	290	Ignición	10
		280	Ignición	12
		270	Ignición	16
		260	Ignición	20
		250	Sin ignición	90

En la Figura 32 se observa la temperatura mínima de ignición en función del tamaño de partícula y del espesor de la muestra.

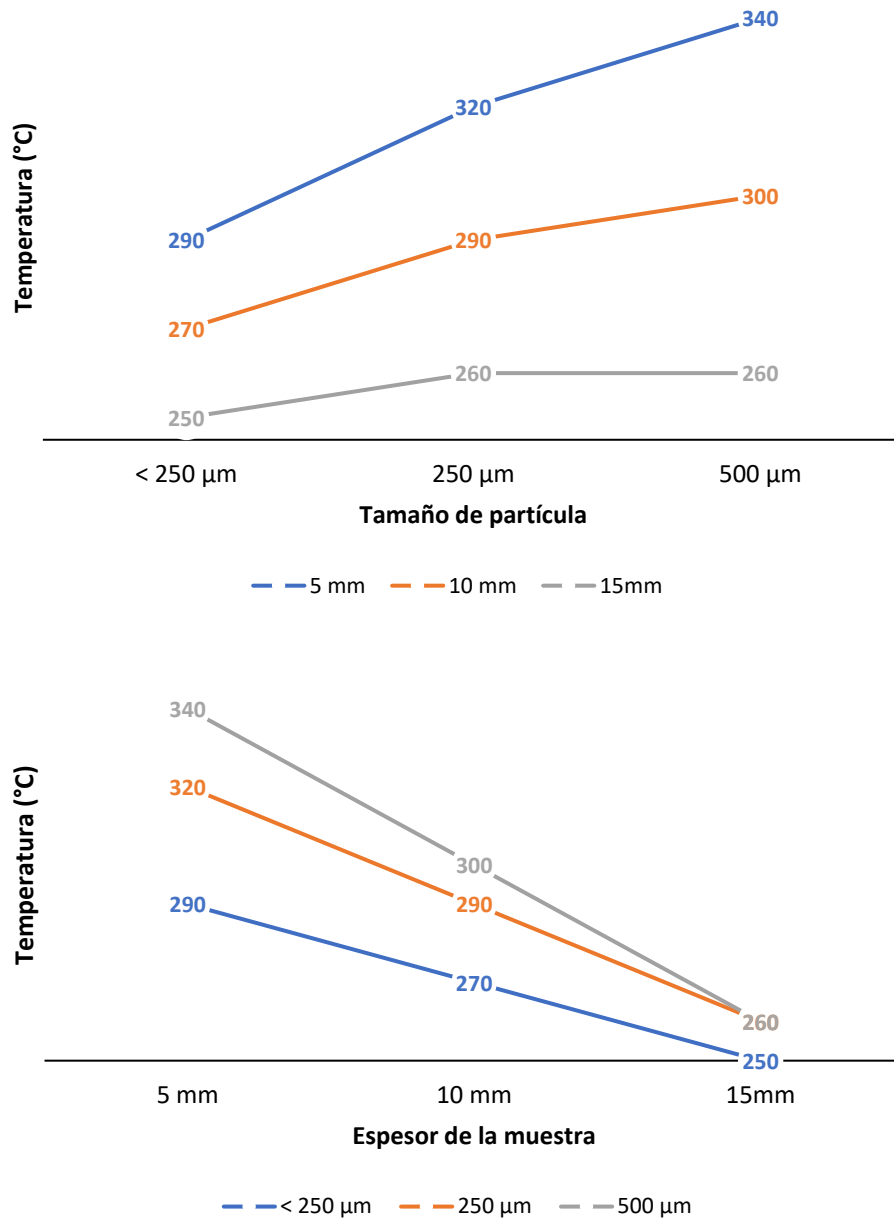


Figura 32. Representación de la temperatura de ignición en función del tamaño de muestra para tres espesores de muestra (superior) y del espesor de la muestra para tres tamaños de partícula (inferior).

En la Figura 33 se muestra la incandescencia que se produce durante los ensayos, responsable de la ignición de la muestra.

En la Figura 34 se muestra la diferencia entre una muestra que ha sufrido ignición con respecto a otra que no ha llegado a combustionar.



Figura 33. Incandescencia originada durante la realización del ensayo.



Figura 34. Comparación entre una muestra que ha sufrido combustión total (a) con otra parcial (b).

3.3. Resultados ensayos de campo con maquinaria

3.3.1. Monitoreo in situ de las cosechadoras

Los datos de temperatura recogidos en las nueve máquinas supervisadas en condiciones de campo se resumen en la Tabla 11. Cabe destacar que las temperaturas más altas se registraron en el colector de escape para todas las máquinas, con temperaturas máximas superiores a 200°C en 5 de las máquinas y, en dos casos (máquinas #1 y #4), con temperaturas superiores a 250°C, que alcanzaron hasta 305°C en la máquina #1 mostrando un importante riesgo de ignición de residuos. Esto corroboraría que la zona del motor (colector de escape) sería una zona clave, en la que se pueden alcanzar temperaturas superiores a la temperatura mínima de ignición del residuo del cultivo (Fernandez-Anez & Garcia-Torrent, 2019).

Tabla 11. Temperaturas registradas durante las campañas de 2018 y 2019 en las nueve cosechadoras monitorizadas en condiciones de campo. Las temperaturas ambientes máximas y la humedad relativa asociada (RH) también se muestran a efectos de comparación

Máquina	Localización de la sonda	N	Cosechadora		Condiciones ambientales	
			T _{op} (°C)	T _{max} (°C)	T _{max} (°C)	HR(%)
Máquina #1	Colector de escape	2448	190.2±42.3	305.4	42.2	29.9
	SCR	2448	97.3±19.2	142.1		
	Caja de cambios	2448	52.2±11.3	105.7		
	Salida de transmisión del motor	2448	69.1±11.4	89.1		
Máquina #2	Filtro de partículas	1418	109.7±16.2	154.2	43.8	20.5
	Caja de cambios	1418	52.5±9.9	97.1		
	Bloque del motor	1418	56.2±5.2	69.2		
	Salida de transmisión del motor	1418	81.1±8.6	95.1		
Máquina #3	Colector de escape	608	118.2±27.3	159.9	42.6	22.6
	Bloque del motor	1121	77.6±9.7	87.9		
	Salida de transmisión del motor	1121	69.4±11.7	87.7		
Máquina #4	Colector de escape	968	216.7±42.5	289.9	44.8	15.8
	Bloque del motor	968	72.5±6.2	82.3		
	Salida de transmisión del motor	968	55.8±7.6	70.4		
	Salida del sistema hidrostático	968	54.9±7.4	69.5		
Máquina #5	Colector de escape	963	155.8±21.2	222.7	44.9	16.4
	Bloque del motor	963	78.3±8.5	93.1		
	Salida del sistema hidrostático	963	51.4±5.9	67.8		
	Culata del motor	963	70.2±4.5	78.8		
Máquina #6	Colector de escape	1665	82.5±13.1	105.8	47.9	11.2
	Bloque del motor	866	70.1±8.1	85.9		
	Salida de transmisión del motor	1665	60.3±8.7	80.4		
Máquina #7	Colector de escape	1036	110.6±21.8	156.4	-	-
	Bloque del motor	1036	71.4±7.7	87.7		
	Salida de transmisión del motor	1036	65.2±9.3	80.1		
Máquina #8	Colector de escape	773	163.3±35.0	230.3	-	-
	Bloque del motor	773	73.7±6.2	84.9		
	Salida de transmisión del motor	773	39.6±12.3	70.6		
Máquina #9	Colector de escape	574	132.8±46.9	243.2	42.8	21.2
	Bloque del motor	574	69.3±4.6	78.8		
	Salida de transmisión del motor	574	70.8±10.6	94.2		

T_{op} significa temperatura de funcionamiento (desviación media- estándar) y T_{max} significa temperatura máxima registrada. SCR significa reducción catalítica selectiva.

Es importante tener en cuenta que el riesgo de incendios originados en las cosechadoras aumenta cuando las condiciones climáticas son adversas (Shutske J. M., et al., 1990). Venem & Shutske, (2002) concluyeron que el 48.5% de los incendios coincidieron con las horas de temperaturas más altas (2:00 PM-4:00 PM). En la Tabla 11 se puede observar que las temperaturas ambientales alcanzaron valores extremos coincidiendo con temperaturas superiores a 250°C en el colector de escape de algunas máquinas lo que constituye situaciones de alto riesgo de incendio. Dado que el número anual de días de alta temperatura (HTD, es decir, días con temperaturas medias superiores a 20, 22.5 y 25°C) está aumentando en el sur de Europa, como lo demuestran Cardil, et al., (2014) para los datos de temperatura en el periodo de junio a septiembre de

1978 a 2012 en el sur de Francia, el interior de España y el noroeste de la Península Ibérica, se espera que la probabilidad de situaciones de alto riesgo de incendio continúe aumentando.

Considerando una temperatura de ignición del residuo de trigo de aproximadamente 250°C, las máquinas #1 y #4 se analizaron con más detalle para determinar el tiempo de funcionamiento en el que se superó este umbral (en este caso, en el colector de escape). La Figura 35 muestra las temperaturas registradas durante el periodo de prueba en el colector de escape de las máquinas #1 y #4.

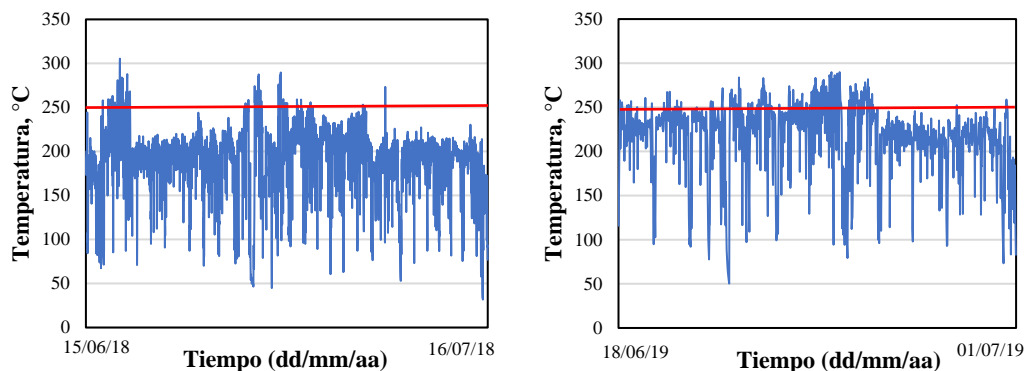


Figura 35. Evolución de la temperatura en el colector de escape (azul) vs temperatura de ignición de la paja (rojo). Izquierda: Máquina 1, Derecha: Máquina 4. No se muestran los periodos en los que las máquinas no funcionaban (por ejemplo, noches).

En el caso de la máquina #1, se puede observar que este umbral (250°C) se superó ocasionalmente (específicamente, el 3.51% del tiempo de trabajo), mientras que en la máquina #4 el umbral se superó durante un 16.63% del tiempo de trabajo, generando así un alto riesgo de ignición del residuo y, en consecuencia, de incendio.

La Figura 36 muestra el histograma de los periodos de tiempo en los que la temperatura excedió los 250°C en las máquinas #1 y #4. Aunque en la mayoría de los periodos la duración fue cercana a los 10 minutos, se registró un periodo de 100 minutos consecutivos con temperaturas superiores a 250°C en la máquina #4, y se registró un periodo de 70 minutos para la máquina #1. Este hecho, teniendo en cuenta los tiempos de ignición de los residuos del cultivo (Tabla 10), refuerza la conclusión sobre el alto riesgo de incendio en el colector de escape de las máquinas #1 y #4.

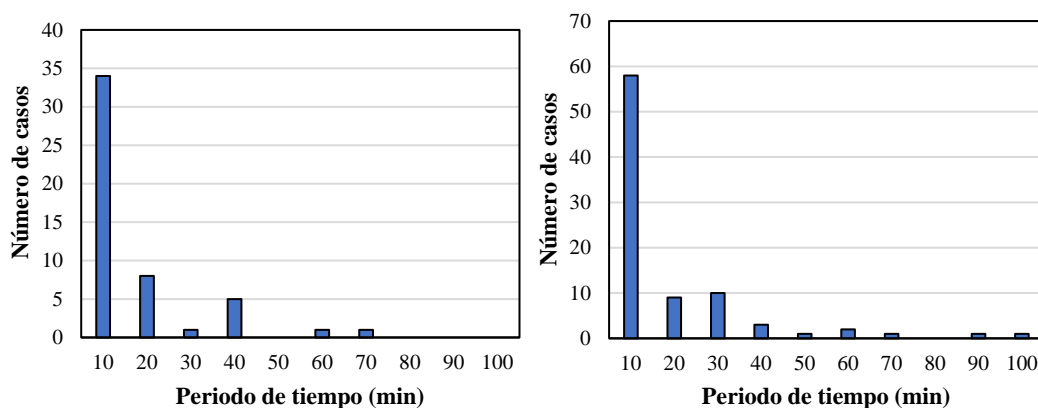


Figura 36. Histograma de periodos de tiempo en los que se alcanzaron temperaturas superiores a 250°C en el colector de escape. Izquierda: máquina #1; Derecha: máquina #4.

Se llevó cabo un análisis univariante de los efectos entre sujetos para las temperaturas en función del sistema de tratamiento de gases de escape teniendo en cuenta las cinco tecnologías presentes en las máquinas probadas (Tabla 1:EGR+DPF; EGR; SCR+EGR+DPF; SCR+EGR; escape no tratado). Según la Tabla 12, hubo diferencias significativas de temperatura ($F=1550.14$; $p=0.000$) dependiendo del sistema de tratamiento de gases de escape. Los resultados de la prueba de HSD de Tukey mostraron diferencias significativas entre todos los sistemas, con las temperaturas medias más altas en los sistemas SCR+EGR y SCR+EGR+DPF (Tabla 13). Aunque el número de máquinas analizado fue reducido, estos resultados invitan a un estudio más amplio relativo al efecto de estas tecnologías a realizar en futuras campañas.

Tabla 12. Test de efectos entre sujetos (resultados del análisis univariado) para las temperaturas en función del sistema de tratamiento de gases de escape.

Fuente	Suma de cuadrados Tipo III	GL	Media de las sumas de los cuadrados	F	Sig.
Modelo corregido	13009104.340 ^a	4	3252276.085	1550.147	.000
Intercepción	136005195.458	1	136005195.458	64824.760	.000
Sistema de tratamiento de gases de escape	13009104.340	4	3252276.085	1550.147	.000
Error	20021633.519	9543	2098.044		
Total	232154209.530	9548			
Total corregido	33030737.859	9547			

a. $R^2 = 0.394$ (R^2 ajustado = 0.394). GL = grados de libertad

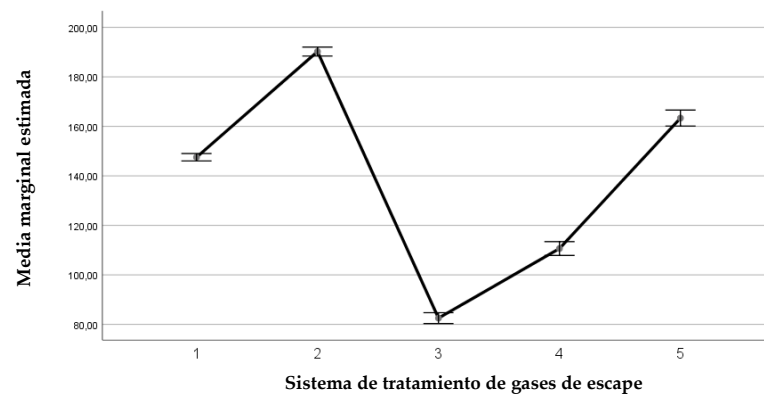


Figura 37. Resultados del análisis univariado para las temperaturas en función del sistema de tratamiento de los gases de escape. Las barras de error indican un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 13. Resultados de la prueba HSD de Tukey para las temperaturas en función del sistema de tratamiento de gases de escape.

Sistema de tratamiento de gases de escape	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
EGR + DPF	1665	82.5238				
EGR (sin filtro)	1036		110.6356			
Escape sin tratar	3626			147.5165		
SCR + EGR + DPF	773				163.3424	
SCR + EGR (sin filtro)	2448					190.2254
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

3.3.2. Barra de corte

Las pruebas realizadas en la barra de corte, la segunda causa más importante de incendio según los datos de la encuesta, permitieron comparar la evolución de la temperatura en una zona de la barra donde las cuchillas funcionan en condiciones normales frente a una zona con una cuchilla sometida a fricción (Figura 38, izquierda). Se observó que 10-15 minutos después de que comenzara el movimiento de la cuchilla de corte, la cuchilla de fricción había alcanzado 428°C (en comparación con una temperatura máxima de 52°C para una cuchilla que funcionaba en condiciones normales). En la imagen térmica (Figura 38, derecha), la diferencia de temperatura entre la zona de la barra sometida a fricción (entre cuchilla y dedo fijo) y las otras cuchillas que trabajan en condiciones normales se hace evidente. Un mantenimiento deficiente, en este caso de la barra de corte, puede provocar temperaturas anormales y generación de zonas con alta temperatura, que en presencia de residuos agrícolas pueden provocar fácilmente un incendio.

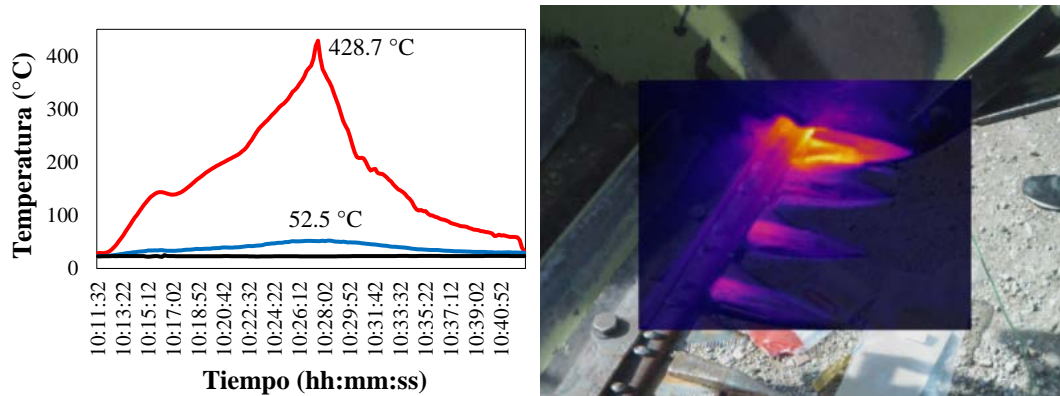


Figura 38. *Izquierda:* Evolución de la temperatura en la barra de corte para una cuchilla en buenas condiciones (azul) y para una cuchilla sometida a fricción (rojo). La temperatura ambiente se muestra en negro. *Derecha:* Imagen térmica de la cuchilla sometida a fricción.

4. CONCLUSIONES

1. A partir del análisis estadístico de los datos de la encuesta, con respecto a las características técnicas de las cosechadoras, sólo el total de hectáreas cosechadas en la vida útil de la máquina tuvo una relación significativa con el riesgo de incendio, de tal manera que el riesgo de incendio aumentaría considerablemente en máquinas con más de 6000 has acumuladas.
2. Se ha obtenido el perfil de cosechadoras con mayor riesgo de incendio, siendo las máquinas con 15 años, 286 CV de potencia y que trabajan unas 598 ha/año. El 10 % de las máquinas es uso de Aragón presentan este perfil, frente al 11% en España.
3. En relación con las zonas de mayor riesgo dentro de la cosechadora, el 32% de los incendios tuvieron su origen en la zona del motor, en comparación con el 31% en la barra de corte y el 18% en los rodamientos y correas.
4. A partir de los experimentos de punto de ignición realizados utilizando muestras de residuos de trigo para describir las condiciones que podrían iniciar incendios en las cosechadoras, se encontró que las temperaturas de ignición oscilarían entre 250 y 340°C, dependiendo del tamaño y grosor de los residuos de trigo.
5. En la monitorización *in situ* de nueve cosechadoras, se detectaron temperaturas de hasta 300 °C en la zona del motor. Concretamente, en el colector de escape de la máquina #1 y de la máquina #4 se alcanzaron 305.4 y 289.9 °C, respectivamente, superándose la temperatura mínima de ignición del residuo.
6. Se encontraron diferencias significativas de temperatura en el colector de escape dependiendo del sistema de tratamiento de gases de escape, con las temperaturas medias más altas para los sistemas SCR+EGR y SCR+EGR+DPF.
7. En la barra de corte, una cuchilla que trabajaba en condiciones de fricción alcanzó temperaturas superiores a 400°C.

BIBLIOGRAFÍA

- Barreiro Elorza, P. (2016). Innovar en cosechadoras de grano. *Vida Rural* (n. 412), 62-66.
- Bragachini, M., Méndez, A., Peiretti, J., Santa Juliana, M., Vélez, J. P., Sanchez, F., . . . Gallarino, A. (s.f.). Incendios de cosechadoras y rastrojos en Argentina y su impacto económico, ambiental y social.
- Cabrero Sopena, R., & Catalán Mogorrón, H. (2010). Cosechadoras (Parte I). *Agricultura*, 392-397.
- Cardil, A., Salis, M., Spano, D., Delogu, G., & Molina Terrén, D. (2014). Large wildland fires and extreme temperatures in Sardinia (Italy). *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 162-169.
- Certificación, A. E. (Mayo de 2016). norma EN ISO/IEC 80079-20-2.
- Eckhoff, R. K. (2009). Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 , 105-116.
- Fernandez-Anez, N., & Garcia-Torrent, J. (2019). Influence of Particle Size and Density on the Hot Surface Ignition of Solid Fuel Layers. *Fire Technology*, 55, 175-191.
- Fernandez-Anez, N., Slatter, D. J., Saeed, M. A., Phylaktou, H. N., Andrews, G. E., & García-Torrent, J. (2018). Ignition sensitivity of solid fuel mixtures. *Fuel* 223, 451-461.
- García Torrent, J., Fernandez Anez, N., Medic Pejic, L., & Montenegro Mateos, L. (2015). Assessment os drlf-ignition risks of solid biofuels by thermal analysis. *Fuel* 143, 484-491.
- García Torrent, J., Ramírez-Gómez, Á., Fernandez-Anez, N., Medic Pejic, L., & Tascón, a. (2016). Influence of the composition os solid biomass in the flammability and susceptibility to spontaneous combustion. *Fuel* 184, 503-511.
- Ibarra Ballesteros, J. C., & Rueda Ordoñez, Y. J. (2017). *Biomasa para el aprovechamiento energético. Una revisión de la caracterización y los modelos por descomposición termoquímica*.
- Keskin, M., & Şekerli, Y. E. (2018). An Evaluation of Combine Harvester Accidents in Turkey. *Journal of Agricultural Faculty os Mustafa Kemal University* 23(2), 137-147.
- Laguna Blanca, A. (1999). *Maquinaria Agrícola: Constitución, funcionamiento, regulaciones y cuidados*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2008). Obtenido de Plataforma de conocimiento para el medio rural y pesquero: https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/cosech-granos-semillas_tcm30-58361.pdf
- Moya González, A., & Barreiro Elorza, P. (2011). Recortar emisiones en vehículos agrícolas. *Tierras de Castilla y León: Agricultura*(n. Extra), 88-94.

- Ortiz-Cañavate, J. (2003). *Las máquinas agrícolas y su aplicación*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Polin, J. P., Gu, Z., Humburg, D., & Dalsted, K. (2013). Sunflower dust properties that contribute to increased fire risk during harvest and biorefinery operations. *Industrial Crops and Products* 50, 227-231.
- Polin, J., Gu, Z., Humburg, D., & Dalsted, K. (2014). Fuente de polvo de girasol en el aire generado durante la operación de cosechadora. *Biosys. Eng.* 126, 23-29.
- Quick, G. R. (2010). An investigation into combine harvester fires. *Grains Research and Development Corporation: Australia*, 20.
- Romero-Uscanga, E., Montero-Alpírez, G., Toscano-Palomar, L., Perez-Pelayo, L., Torres-Ramos, R., & Beleño-Cabarcas, M. T. (2014). Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica; celulosa, hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico. *XVII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas Agricultura sustentable: Uso eficiente del agua, suelo y fertilizantes*, (págs. 114-118). Mexicali, Baja California, México.
- Shutske, J. M., & Field, W. E. (1988). An integrated control strategy for grain combine fires. 17.
- Shutske, J. M., Field, W. E., & Chaplin, J. (1994). Grain Combine Fires: A Loss Reduction Approach. *American Society of Agricultural Engineers*, 175-182.
- Shutske, J. M., Field, W. E., Gaultney, L. D., & Parsons, S. D. (1990). Agricultural Machinery Fire Losses: A Preventative Approach. *Appl. Eng. Agric.* 6, 575-581.
- Valero Ubierna, C. (2005). Cosechadoras de cereal: nuevos modelos, nuevas tecnologías. *Vida Rural*, 52-57.
- Venem, M., & Shutske, J. (2002). Combine fire prevention and control summit. *CIGR XVth World Congress; American Society of Agricultural and Biological Engineers*, (pág. 028017). Chicago, IL, USA.
- White, B., & Giumelli, J. (2006). Owner survey: Harvester fires. *Kondinin Group: Australia*.

ANEXO

Tabla A1. Tabla de contingencia entre antigüedad e incendio

			Incendio		Total
			0	1	
Antigüedad	0-10 años	Recuento	63	40	103
		Frecuencia esperada	63.7	39.3	103,0
		% dentro de antigüedad	61.2%	38.8%	100,0%
		% dentro de Incendio	56.3%	58.0%	56,9%
		% del total	34.8%	22.1%	56,9%
		Residuos corregidos	-.2	.2	
	11-20 años	Recuento	29	20	49
		Frecuencia esperada	30.3	18.7	49,0
		% dentro de antigüedad	59.2%	40.8%	100,0%
		% dentro de Incendio	25.9%	29.0%	27,1%
		% del total	16.0%	11.0%	27,1%
		Residuos corregidos	-.5	.5	
	> 20 años	Recuento	20	9	29
		Frecuencia esperada	17.9	11.1	29,0
		% dentro de antigüedad	69.0%	31.0%	100,0%
		% dentro de Incendio	17.9%	13.0%	16,0%
		% del total	11.0%	5.0%	16,0%
		Residuos corregidos	.9	-.9	
Total	Recuento	112	69	181	
	Frecuencia esperada	112,0	69.0	181.0	
	% dentro de antigüedad	61,9%	38.1%	100.0%	
	% dentro de Incendio	100,0%	100.0%	100.0%	
	% del total	61,9%	38.1%	100.0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	.791 ^a	2	.673
Razón de verosimilitudes	.807	2	.668
Asociación lineal por lineal	.323	1	.570
N de casos válidos	181		

a. 0 casillas (.0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 11.06.

Tabla A2. Tabla de contingencia entre potencia e incendio

		Incendio		Total
		0	1	
Potencia	Recuento	4	2	6
	Frecuencia esperada	4.0	2.0	6,0
	% dentro de potencia	66.7%	33.3%	100,0%
	% dentro de Incendio	2.8%	2.7%	2,8%
	% del total	1.8%	.9%	2,8%
	Residuos corregidos	.0	.0	
	Recuento	25	7	32
	Frecuencia esperada	21.1	10.9	32,0
	% dentro de potencia	78.1%	21.9%	100,0%
	% dentro de Incendio	17.4%	9.5%	14,7%
	% del total	11.5%	3.2%	14,7%
	Residuos corregidos	1.6	-1.6	
	Recuento	30	15	45
	Frecuencia esperada	29.7	15.3	45,0
	% dentro de potencia	66.7%	33.3%	100,0%
	% dentro de Incendio	20.8%	20.3%	20,6%
	% del total	13.8%	6.9%	20,6%
	Residuos corregidos	.1	-.1	
	Recuento	25	18	43
	Frecuencia esperada	28.4	14.6	43,0
Potencia	% dentro de potencia	58.1%	41.9%	100,0%
	% dentro de Incendio	17.4%	24.3%	19,7%
	% del total	11.5%	8.3%	19,7%
	Residuos corregidos	-1.2	1.2	
	Recuento	26	12	38
	Frecuencia esperada	25.1	12.9	38,0
	% dentro de potencia	68.4%	31.6%	100,0%
	% dentro de Incendio	18.1%	16.2%	17,4%
	% del total	11.9%	5.5%	17,4%
	Residuos corregidos	.3	-.3	
	Recuento	11	7	18
	Frecuencia esperada	11.9	6.1	18,0
	% dentro de potencia	61.1%	38.9%	100,0%
	% dentro de Incendio	7.6%	9.5%	8,3%
	% del total	5.0%	3.2%	8,3%
	Residuos corregidos	-.5	.5	
	Recuento	23	13	36
	Frecuencia esperada	23.8	12.2	36,0
	% dentro de potencia	63.9%	36.1%	100,0%
	% dentro de Incendio	16.0%	17.6%	16,5%
	% del total	10.6%	6.0%	16,5%
	Residuos corregidos	-.3	.3	
Total	Recuento	144	74	218
	Frecuencia esperada	144,0	74.0	218.0
	% dentro de potencia	66,1%	33.9%	100.0%
	% dentro de Incendio	100,0%	100.0%	100.0%
	% del total	66,1%	33.9%	100.0%

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	3.656 ^a	6	.723
Razón de verosimilitudes	3.774	6	.707
Asociación lineal por lineal	.856	1	.355
N de casos válidos	218		

a. 2 casillas (14.3%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 2.04.

Tabla A3. Tabla de contingencia entre hectáreas anuales e incendio

		Incendio		Total	
		0	1		
Hectáreas anuales	50	Recuento	16	6	22
		Frecuencia esperada	14.6	7.4	22,0
		% dentro de ha anuales	72.7%	27.3%	100,0%
		% dentro de Incendio	10.9%	8.1%	10,0%
		% del total	7.2%	2.7%	10,0%
		Residuos corregidos	.7	-.7	
	175	Recuento	32	14	46
		Frecuencia esperada	30.6	15.4	46,0
		% dentro de ha anuales	69.6%	30.4%	100,0%
		% dentro de Incendio	21.8%	18.9%	20,8%
		% del total	14.5%	6.3%	20,8%
		Residuos corregidos	.5	-.5	
	375	Recuento	41	25	66
		Frecuencia esperada	43.9	22.1	66,0
		% dentro de ha anuales	62.1%	37.9%	100,0%
		% dentro de Incendio	27.9%	33.8%	29,9%
		% del total	18.6%	11.3%	29,9%
		Residuos corregidos	-.9	.9	
	600	Recuento	58	29	87
		Frecuencia esperada	57.9	29.1	87,0
		% dentro de ha anuales	66.7%	33.3%	100,0%
		% dentro de Incendio	39.5%	39.2%	39,4%
		% del total	26.2%	13.1%	39,4%
		Residuos corregidos	.0	.0	
Total	Recuento	147	74	221	
	Frecuencia esperada	147,0	74.0	221.0	
	% dentro de ha anuales	66,5%	33.5%	100.0%	
	% dentro de Incendio	100,0%	100.0%	100.0%	
	% del total	66,5%	33.5%	100.0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	1.146 ^a	3	.766
Razón de verosimilitudes	1.152	3	.765
Asociación lineal por lineal	.253	1	.615
N de casos válidos	221		

a. 0 casillas (.0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 7.37.

Tabla A4. Tabla de contingencia entre hectáreas acumuladas e incendio

		Incendio		Total	
		0	1		
Hectáreas acumuladas	0-2000 ha	Recuento	53	22	75
		Frecuencia esperada	46.6	28.4	75,0
		% dentro de has acumuladas	70.7%	29.3%	100,0%
		% dentro de Incendio	46.9%	31.9%	41,2%
		% del total	29.1%	12.1%	41,2%
		Residuos corregidos	2.0	-2.0	
	2001-4000 ha	Recuento	21	13	34
		Frecuencia esperada	21.1	12.9	34,0
		% dentro de has acumuladas	61.8%	38.2%	100,0%
		% dentro de Incendio	18.6%	18.8%	18,7%
		% del total	11.5%	7.1%	18,7%
		Residuos corregidos	.0	.0	
	4001-6000 ha	Recuento	29	19	48
		Frecuencia esperada	29.8	18.2	48,0
		% dentro de has acumuladas	60.4%	39.6%	100,0%
		% dentro de Incendio	25.7%	27.5%	26,4%
		% del total	15.9%	10.4%	26,4%
		Residuos corregidos	-.3	.3	
	> 6000 ha	Recuento	10	15	25
		Frecuencia esperada	15.5	9.5	25,0
		% dentro de has acumuladas	40.0%	60.0%	100,0%
		% dentro de Incendio	8.8%	21.7%	13,7%
		% del total	5.5%	8.2%	13,7%
		Residuos corregidos	-2.5	2.5	
Total	Recuento	113	69	182	
	Frecuencia esperada	113,0	69.0	182.0	
	% dentro de has acumuladas	62,1%	37.9%	100.0%	
	% dentro de Incendio	100,0%	100.0%	100.0%	
	% del total	62,1%	37.9%	100.0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	7.585 ^a	3	.055
Razón de verosimilitudes	7.468	3	.058
Asociación lineal por lineal	6.415	1	.011
N de casos válidos	182		

a. 0 casillas (.0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 9.48.

Tabla A5. Tabla de contingencia entre hectáreas acumuladas y picador.

		Picador			Total	
		0	1	2		
Hectáreas acumuladas	0-2000 ha	Recuento	15	7	0	22
		Frecuencia esperada	12.1	8.6	1.3	22,0
		% dentro de has acumuladas	68.2%	31.8%	.0%	100,0%
		% dentro de Picador	39.5%	25.9%	.0%	31,9%
		% del total	21.7%	10.1%	.0%	31,9%
		Residuos corregidos	1.5	-.9	-1.4	
	2001-4000 ha	Recuento	8	5	0	13
		Frecuencia esperada	7.2	5.1	.8	13,0
		% dentro de has acumuladas	61.5%	38.5%	.0%	100,0%
		% dentro de Picador	21.1%	18.5%	.0%	18,8%
		% del total	11.6%	7.2%	.0%	18,8%
		Residuos corregidos	.5	-.1	-1.0	
	4001-6000 ha	Recuento	8	8	3	19
		Frecuencia esperada	10.5	7.4	1.1	19,0
		% dentro de has acumuladas	42.1%	42.1%	15.8%	100,0%
		% dentro de Picador	21.1%	29.6%	75.0%	27,5%
		% del total	11.6%	11.6%	4.3%	27,5%
		Residuos corregidos	-1.3	.3	2.2	
	> 6000 ha	Recuento	7	7	1	15
		Frecuencia esperada	8.3	5.9	.9	15,0
		% dentro de has acumuladas	46.7%	46.7%	6.7%	100,0%
		% dentro de Picador	18.4%	25.9%	25.0%	21,7%
		% del total	10.1%	10.1%	1.4%	21,7%
		Residuos corregidos	-.7	.7	.2	
Total	Recuento	38	27	4	69	
	Frecuencia esperada	38,0	27.0	4.0	69.0	
	% dentro de has acumuladas	55,1%	39.1%	5.8%	100.0%	
	% dentro de Picador	100,0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	% del total	55,1%	39.1%	5.8%	100.0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	7.442 ^a	6	.282
Razón de verosimilitudes	8.429	6	.208
Asociación lineal por lineal	3.806	1	.051
N de casos válidos	69		

a. 4 casillas (33.3%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es .75.

Tabla A6. Tabla de contingencia entre hectáreas acumuladas y antigüedad.

		antigüedad			Total	
		0-10 años	11-20 años	> 20 años		
Hectáreas acumuladas	0-2000 ha	Recuento	56	8	10	74
		Frecuencia esperada	42.1	20.0	11.9	74.0
		% dentro de has acumuladas	75.7%	10.8%	13.5%	100.0%
		% dentro de antigüedad	54.4%	16.3%	34.5%	40.9%
		% del total	30.9%	4.4%	5.5%	40.9%
		Residuos corregidos	4.2	-4.1	-.8	
	2001-4000 ha	Recuento	24	10	0	34
		Frecuencia esperada	19.3	9.2	5.4	34.0
		% dentro de has acumuladas	70.6%	29.4%	.0%	100.0%
		% dentro de antigüedad	23.3%	20.4%	.0%	18.8%
		% del total	13.3%	5.5%	.0%	18.8%
		Residuos corregidos	1.8	.3	-2.8	
	4001-6000 ha	Recuento	23	12	13	48
		Frecuencia esperada	27.3	13.0	7.7	48.0
		% dentro de has acumuladas	47.9%	25.0%	27.1%	100.0%
		% dentro de antigüedad	22.3%	24.5%	44.8%	26.5%
		% del total	12.7%	6.6%	7.2%	26.5%
		Residuos corregidos	-1.5	-.4	2.4	
	> 6000 ha	Recuento	0	19	6	25
		Frecuencia esperada	14.2	6.8	4.0	25.0
		% dentro de has acumuladas	.0%	76.0%	24.0%	100.0%
		% dentro de antigüedad	.0%	38.8%	20.7%	13.8%
		% del total	.0%	10.5%	3.3%	13.8%
		Residuos corregidos	-6.2	5.9	1.2	
Total	Recuento	103	49	29	181	
	Frecuencia esperada	103.0	49.0	29.0	181.0	
	% dentro de has acumuladas	56.9%	27.1%	16.0%	100.0%	
	% dentro de antigüedad	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	% del total	56.9%	27.1%	16.0%	100.0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	60.485 ^a	6	.000
Razón de verosimilitudes	73.736	6	.000
Asociación lineal por lineal	27.022	1	.000
N de casos válidos	181		

a. 1 casillas (8.3%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 4.01.

Tabla A7. Tabla de contingencia entre hectáreas acumuladas y potencia.

		potencia							Total	
		50	125	175	225	275	325	375		
Hectáreas acumuladas	0-2000 ha	Recuento	5	18	13	10	7	5	17	75
		Frecuencia esperada	2.5	10.8	16.3	15.4	11.3	6.7	12.1	75,0
		% dentro de has acumuladas	6.7%	24.0%	17.3%	13.3%	9.3%	6.7%	22.7%	100,0%
		% dentro de potencia	83.3%	69.2%	33.3%	27.0%	25.9%	31.3%	58.6%	41,7%
		% del total	2.8%	10.0%	7.2%	5.6%	3.9%	2.8%	9.4%	41,7%
		Residuos corregidos	2.1	3.1	-1.2	-2.0	-1.8	-.9	2.0	
	2001-4000 ha	Recuento	0	3	11	8	8	2	2	34
		Frecuencia esperada	1.1	4.9	7.4	7.0	5.1	3.0	5.5	34,0
		% dentro de has acumuladas	.0%	8.8%	32.4%	23.5%	23.5%	5.9%	5.9%	100,0%
		% dentro de potencia	.0%	11.5%	28.2%	21.6%	29.6%	12.5%	6.9%	18,9%
		% del total	.0%	1.7%	6.1%	4.4%	4.4%	1.1%	1.1%	18,9%
		Residuos corregidos	-1.2	-1.0	1.7	.5	1.5	-.7	-1.8	
	4001-6000 ha	Recuento	1	4	10	10	10	7	5	47
		Frecuencia esperada	1.6	6.8	10.2	9.7	7.1	4.2	7.6	47,0
		% dentro de has acumuladas	2.1%	8.5%	21.3%	21.3%	21.3%	14.9%	10.6%	100,0%
		% dentro de potencia	16.7%	15.4%	25.6%	27.0%	37.0%	43.8%	17.2%	26,1%
		% del total	.6%	2.2%	5.6%	5.6%	5.6%	3.9%	2.8%	26,1%
		Residuos corregidos	-.5	-1.3	-.1	.1	1.4	1.7	-1.2	
	> 6000 ha	Recuento	0	1	5	9	2	2	5	24
		Frecuencia esperada	.8	3.5	5.2	4.9	3.6	2.1	3.9	24,0
		% dentro de has acumuladas	.0%	4.2%	20.8%	37.5%	8.3%	8.3%	20.8%	100,0%
		% dentro de potencia	.0%	3.8%	12.8%	24.3%	7.4%	12.5%	17.2%	13,3%
		% del total	.0%	.6%	2.8%	5.0%	1.1%	1.1%	2.8%	13,3%
		Residuos corregidos	-1.0	-1.5	-.1	2.2	-1.0	-.1	.7	
Total	Recuento	6	26	39	37	27	16	29	180	
	Frecuencia esperada	6,0	26,0	39,0	37,0	27,0	16,0	29,0	180,0	
	% dentro de has acumuladas	3,3%	14,4%	21,7%	20,6%	15,0%	8,9%	16,1%	100,0%	
	% dentro de potencia	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% del total	3,3%	14,4%	21,7%	20,6%	15,0%	8,9%	16,1%	100,0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	34.182 ^a	18	.012
Razón de verosimilitudes	35.553	18	.008
Asociación lineal por lineal	2.388	1	.122
N de casos válidos	180		

a. 12 casillas (42.9%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es .80.

Tabla A8. Tabla de contingencia entre hectáreas acumuladas y hectáreas anuales.

			ha anuales				Total
			50	175	375	600	
Hectáreas acumuladas	0-2000 ha	Recuento	19	14	9	33	75
		Frecuencia esperada	7.8	15.2	23.1	28.8	75,0
		% dentro de has acumuladas	25.3%	18.7%	12.0%	44.0%	100,0%
		% dentro de ha anuales	100.0%	37.8%	16.1%	47.1%	41,2%
		% del total	10.4%	7.7%	4.9%	18.1%	41,2%
		Residuos corregidos	5.5	-5	-4.6	1.3	
	2001-4000 ha	Recuento	0	10	23	1	34
		Frecuencia esperada	3.5	6.9	10.5	13.1	34,0
		% dentro de has acumuladas	.0%	29.4%	67.6%	2.9%	100,0%
		% dentro de ha anuales	.0%	27.0%	41.1%	1.4%	18,7%
		% del total	.0%	5.5%	12.6%	.5%	18,7%
		Residuos corregidos	-2.2	1.5	5.2	-4.7	
	4001-6000 ha	Recuento	0	13	12	23	48
		Frecuencia esperada	5.0	9.8	14.8	18.5	48,0
		% dentro de has acumuladas	.0%	27.1%	25.0%	47.9%	100,0%
		% dentro de ha anuales	.0%	35.1%	21.4%	32.9%	26,4%
		% del total	.0%	7.1%	6.6%	12.6%	26,4%
		Residuos corregidos	-2.8	1.4	-1.0	1.6	
	> 6000 ha	Recuento	0	0	12	13	25
		Frecuencia esperada	2.6	5.1	7.7	9.6	25,0
% dentro de has acumuladas		.0%	.0%	48.0%	52.0%	100,0%	
% dentro de ha anuales		.0%	.0%	21.4%	18.6%	13,7%	
% del total		.0%	.0%	6.6%	7.1%	13,7%	
Residuos corregidos		-1.8	-2.7	2.0	1.5		
Total	Recuento	19	37	56	70	182	
	Frecuencia esperada	19,0	37,0	56,0	70,0	182,0	
	% dentro de has acumuladas	10,4%	20,3%	30,8%	38,5%	100,0%	
	% dentro de ha anuales	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% del total	10,4%	20,3%	30,8%	38,5%	100,0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	75.352 ^a	9	.000
Razón de verosimilitudes	92.810	9	.000
Asociación lineal por lineal	11.047	1	.001
N de casos válidos	182		

a. 2 casillas (12.5%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 2.61.

Tabla A9. Tabla de contingencia Zonas de la máquina * Picador

		Picador			Total	
		0	1	2		
Zonas de la máquina	1	Recuento	11	13	4	28
		Frecuencia esperada	16.3	10.2	1.5	28.0
		% dentro de zonas de la máquina	39.3%	46.4%	14.3%	100.0%
		% dentro de picador	20.8%	39.4%	80.0%	30.8%
		% del total	12.1%	14.3%	4.4%	30.8%
		Residuos corregidos	-2.4	1.3	2.5	
	2	Recuento	4	4	0	8
		Frecuencia esperada	4.7	2.9	.4	8.0
		% dentro de zonas de la máquina	50.0%	50.0%	.0%	100.0%
		% dentro de picador	7.5%	12.1%	.0%	8.8%
		% del total	4.4%	4.4%	.0%	8.8%
		Residuos corregidos	-.5	.8	-.7	
	3	Recuento	20	8	1	29
		Frecuencia esperada	16.9	10.5	1.6	29.0
		% dentro de zonas de la máquina	69.0%	27.6%	3.4%	100.0%
		% dentro de picador	37.7%	24.2%	20.0%	31.9%
		% del total	22.0%	8.8%	1.1%	31.9%
		Residuos corregidos	1.4	-1.2	-.6	
	4	Recuento	8	2	0	10
		Frecuencia esperada	5.8	3.6	.5	10.0
		% dentro de zonas de la máquina	80.0%	20.0%	.0%	100.0%
		% dentro de picador	15.1%	6.1%	.0%	11.0%
		% del total	8.8%	2.2%	.0%	11.0%
		Residuos corregidos	1.5	-1.1	-.8	
	5	Recuento	10	6	0	16
		Frecuencia esperada	9.3	5.8	.9	16.0
		% dentro de zonas de la máquina	62.5%	37.5%	.0%	100.0%
		% dentro de picador	18.9%	18.2%	.0%	17.6%
		% del total	11.0%	6.6%	.0%	17.6%
		Residuos corregidos	.4	.1	-1.1	
Total	Recuento	53	33	5	91	
	Frecuencia esperada	53.0	33.0	5.0	91.0	
	% dentro de zonas de la máquina	58.2%	36.3%	5.5%	100.0%	
	% dentro de picador	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	% del total	58.2%	36.3%	5.5%	100.0%	

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	11.836 ^a	8	.159
Razón de verosimilitudes	12.720	8	.122
N de casos válidos	91		

a. 8 casillas (53.3%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es .44.

Article

Fire Risks Associated with Combine Harvesters: Analysis of Machinery Critical Points

Jesús P. Val-Aguasca ¹, María Videgain-Marco ¹, Pablo Martín-Ramos ¹, Mariano Vidal-Cortés ², Antonio Boné-Garasa ³ and F. Javier García-Ramos ^{1,*}

¹ Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca, Spain; 648857@unizar.es (J.P.V.-A.), mvidegain@unizar.es (M.V.-M.), pmr@unizar.es (P.M.-R.)

² Departamento de Ingeniería Mecánica, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca, Spain; vidalcor@unizar.es.

³ Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca, Spain; anbone@unizar.es.

* Correspondence: fjavier@unizar.es; Tel.: +34-974239305 (F.J.G.-R.)

Received: date; Accepted: date; Published: date

Abstract: Combine harvesters are an important cause of fires worldwide. The purpose of this work has been to investigate the critical points associated with the risk of fire, identified through a survey distributed to combine owners in Aragon (Spain). Information was collected on the technical characteristics of the machines and, when appropriate, on the characteristics of the generated fires (crop, use of straw chopper, point in which the fire was originated, etc.). Based on the survey data, relationships between the characteristics of the machine and the ignition of a fire were analyzed, and the points of the harvester in which the fire originated were investigated. A statistically significant relationship of fire risk was only found with the number of hectares harvested, in such a way that the risk would be especially high for machines with more than 6000 accumulated ha. 32% of the fires were originated in the engine zone, compared with 31% in the cutting bar and 18% in the bearings and belts. The study was completed with on-site temperature measurements carried out on nine machines in 2018 and 2019, in which temperatures above 250 °C were recorded in the exhaust manifold and in the cutting bar. These temperatures exceeded the ignition thresholds obtained in the flammability studies conducted for wheat residues collected from the harvesters.

Keywords: agricultural machinery; cutting bar; EN ISO/IEC 80079-20-2; flammability; ignition temperature; straw chopper; temperature sensor

1. Introduction

Fires constitute a serious threat, both due to the destruction of environmental heritage and of forest crops, material goods and human lives [1]. Taking into account the very high percentage of unwanted fires related to human activities and behaviors [2], long-term policies must focus on eliminating these causes. The analysis of social, technical, ecological and economic factors that contribute to fire risk should be the starting point of those policies [3]. Agriculture is one of the sectors to be studied.

Agricultural losses due to fires are not limited, in the short term, to the destruction of crops, but, in the medium term, result in production capacity losses that have been estimated in 35–45% in subsequent years [4].

In Spain, the causes behind fires are of different nature. Based on monthly newsletters published by the Spanish Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAPA), the causality of fires (classified into 5 groups: negligence and accident, intentional, natural (lightning), unknown and fire

reproduction) can be analyzed for the different regions. In the case of Aragon, there were 226 and 357 forest fires in 2018 and 2019, which affected a total surface of 215 and 1291 ha, respectively. The second most important cause of those fires, after negligence, was associated with agricultural machinery (including harvesters), which accounted for 8.8% of the fires that occurred in 2018 and 9.2% of those that took place in 2019.

The possible causes of fire ignition in agricultural machines and specifically in harvesters are very varied. Quick [5] lists a number of potential points in which fire can start: engine and flue gas outlets, transmissions, bearings, brakes, electrical short-circuits, impact of mowing heads with stones or other elements, and introduction of foreign bodies into the machine. Of all of them, the most common cause is the accumulation of combustible material in points with high temperatures located near the engine. The surface temperatures of these elements can reach 500 °C [5], exceeding the ignition temperatures of the crop residues, which vary depending on the thickness of the sample, but which are generally above 200 °C in the case of wheat straw [6]. As for the spread of the fire, field conditions can favor or hinder the process, which would be influenced by four main factors: relative humidity, ambient temperature, wind speed and type and condition of the crop [5,7].

Despite the importance of the consequences of agricultural and forest fires, there are hardly any studies focused on the causes of fires in combine harvesters. So far, the most important studies have been those carried out in the USA by Shutske et al. [8,9], in which the authors investigated over 4,000 fires in harvesters and tractors, and were able to gain access to the machine to perform a detailed study in 265 cases. Based on the data obtained, the authors concluded that 74% of the fires originated in the engine area due to different causes (e.g., surface heating, combustion gas outlet and electrical components). It was also concluded that the material that started the fire was generally the crop residues, followed by fuel and oil remains.

In Australia, another study by White et al. [10] (Kondinin group), conducted with data from 1170 farmers, reported that approximately 25% of respondents had experienced a fire in their harvesters. According to the farmers, the main cause of fire was the accumulation of dust and crop residues on the hot surfaces of the machine (33% of the cases) followed by the heating of bearings (22%). It was also concluded that regular maintenance and cleaning of the machine was key to reducing the risk of fire. In another study, also carried out in Australia, Quick [5] analyzed 77 cases of fires in harvesters, estimating that 45% of the fires originated in the area of the engine, followed by bearings and transmissions with 22%. It was also concluded that the accumulation of electrostatic charges was an important cause for the ignition of the fire, highlighting the importance of an appropriate maintenance and monitoring of the equipment to prevent fires. In Turkey, Keskin et al. [11] examined 116 combine harvesters field accidents, concluding that 41.4% of those accidents were caused by fire originated in engine, fuel loading, cutting head and electric contacts.

In the absence of data in Spain, this work aims to provide information on the risks of fire in harvesters in Aragon, in order to characterize the profile of the machines that would be more prone to start a fire. To this end, a survey was distributed among harvester owners and several machines were continuously monitored throughout the 2018 and 2019 summer harvest campaigns in order to obtain information about the temperatures reached in different parts of the machines, comparing them with flammability studies for wheat residues collected from the harvesters.

2. Material and Methods

2.1. Survey

A survey was carried out among harvester owners in Aragon with a view to identifying critical points of the machinery, as well as to characterize the profile of the machines with the highest risk of fire. The survey was structured in two blocks: the first one referred to the technical characteristics of the machine (manufacturer, power, age of the machine, harvested hectares, etc.) and was applicable to all harvesters, while the second block focused on the characteristics of the fire in the harvester (crop, point of the machine in which the fire originated, etc.) and only applied to harvesters associated with fires. The complete survey is available at <http://bit.ly/encuestacosechadoras>.

Subsequently, a statistical analysis was performed with SPSS v.18 software (IBM, Chicago, IL, USA). The analysis had three parts: first, the relationship between the power, age and annual harvested hectares variables was analyzed, creating a new variable named “accumulated hectares”, which represented the number of hectares that had been harvested when the fire occurred (that is, annual harvested hectares \times age) and which would refer to the wear or use of the machine at the time of the fire. In a second stage, the relationship of the variables mentioned above with the risk of fire was studied, using contingency tables. For this, categorical variables were created for the accumulated hectares (0-2000 ha, 2001-4000 ha, 4001-6000 ha and >6000 ha) and for the age of the machine (0-10 years, 11-20 years and >20 years). In the third part, the areas of origin of the fire were investigated.

2.2. Flammability and Susceptibility to Spontaneous Combustion Studies

In the 2018 harvest season, samples of wheat residue accumulated in different areas of five combine harvesters (cutting head, front axle, straw chopper, engine area, lateral area of the machine with transmissions to cleaning systems) were collected in order to study their ignition point properties, correlating them with the temperatures measured in the harvesters. The proximate and elemental analysis results are summarized in Table S1, and the granulometric analysis results are reported in Table S2.

Wheat residues were dried in an oven at 105 °C for 24 h. Subsequently, samples were sieved using a sieve tower with five sieves (with 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μ m and 250 μ m mesh apertures) and a BA200N electromagnetic sieve shaker (CISA, Barcelona, Spain), for 3 min and with an oscillation amplitude of 2 mm.

The combustion mechanism was investigated by thermal gravimetric (TG) and differential scanning calorimetry (DSC) analyses, conducted using a TG-DSC2 (Mettler-Toledo, Columbus, OH, USA) simultaneous analyzer. The analyses were carried out both in inert (N₂) and oxidizing (air) atmosphere, in the 25-600 °C range, at a heating rate of 20 °C/min.

Ignition tests were carried out according to UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016. “Explosive atmospheres. Part 20-2: Material characteristics-Combustible dusts test methods”. Three thicknesses of wheat residue (5 mm, 10 mm and 15 mm) were assayed, and for each thickness three particle sizes (<250 μ m, 250 μ m and 500 μ m) were tested. A fully compliant custom-made hot plate layer ignition apparatus, supplied by the Electronic Instrumentation Laboratory at Universidad de Zaragoza, was used in the tests.

2.3. In-situ Harvester Monitoring

Throughout the 2018 and 2019 harvest campaigns, nine machines were monitored, installing temperature probes (type K thermocouples) in different points of each machine, in addition to ambient temperature/humidity probes (HOBO Pro v2) outside (in the exterior antennas of the cabins). The points selected to place the temperature probes were chosen based on the risk zones detected in the initial survey and on the feasibility of placing temperature probes during the harvest process (Table 1): exhaust manifold, selective catalytic reduction system (SCR, next to the urea injection point), diesel particulate filter (DPF), engine block, gearbox, engine transmission output, hydrostatic system output and engine cylinder heads. Table 2 shows the main characteristics of the monitored harvesters, which were selected with the aim of having a variety of machines that could be sufficiently representative of the fleet of harvesters in Aragón.

Table 1. Probe locations in the monitored harvesters.

Probe location	Harvester					
	1	2	3	4	5	6-7-8-9
Exhaust manifold	X		X	X	X	X
SCR	X					
DPF		X				
Engine block		X	X	X	X	X
Gearbox	X	X				
Engine transmission output	X	X	X	X		X
Hydrostatic system output				X	X	
Engine cylinder heads					X	

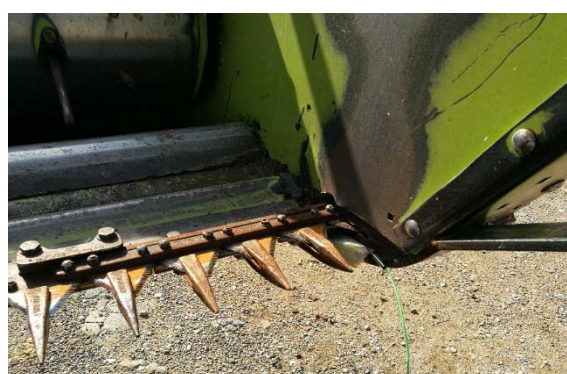
* SCR and DPF stand for selective catalytic reduction and diesel particulate filter, respectively.

Table 2. Characteristics of the combine harvesters monitored in 2018 and 2019.

Machine	Power (HP/kW)	Age (years)	Cutting width (m)	ha/year	Technical characteristics*	Monitored period (dd/mm/yy)
Machine #1	435/320	0	7.7	>500	SCR + EGR (w/o filter)	15/06/18-16/07/18
Machine #2	435/320	2	7.7	>500	EGR + DPF	15/06/18-16/17/18
Machine #3	160/119	16	5.1	200	Untreated exhaust	15/06/18-16/07/18
Machine #4	250/184	8	6.1	>500	Untreated exhaust	18/06/19-01/07/19
Machine #5	180/132	16	5.2	>500	Untreated exhaust	18/06/19-01/07/19
Machine #6	275/202	3	6.7	>500	EGR + DPF	13/06/19-06/07/19
Machine #7	220/164	10	6.0	350	EGR (w/o filter)	22/06/19-04/07/19
Machine #8	400/294	0	7.0	>500	SCR + EGR + DPF	03/07/19-19/07/19
Machine #9	420/309	13	7.0	>500	Untreated exhaust	04/07/19-19/07/19

* SCR, EGR and DPF stand for selective catalytic reduction, exhaust gas recirculation and diesel particulate filter, respectively.

Additionally, a test was carried out with a harvester's cutting bar in poor conditions and with very little maintenance, with the cutting bar running and the machine parked. For this, three thermocouples were installed in the cutting bar (on a blade with friction, on a normal blade and on a cutting plate) to monitor temperature evolution. The measurements were complemented with those obtained with a Fluke Ti200 infrared thermal camera (Everett, WA, USA). One of the probes installed on the cutting bar is shown in Figure 1.

**Figure 1.** Temperature probe installed in cutting bar.

3. Results and Discussion

3.1. Relationships between Variables

In the survey distributed among combine harvester owners, data from 221 harvesters were obtained, reporting 74 cases of fire. Based on the data of the 221 harvesters, Figure 2 shows the relationships between the harvested hectares per year, power, age, and accumulated hectares variables, starting from the hypothesis that the machines that harvest more hectares per year will be more exposed and may be more likely to cause a fire. It can be observed that the machines that harvest more hectares per year have higher power levels, are newer and have a higher number of accumulated harvested hectares (i.e., greater wear).

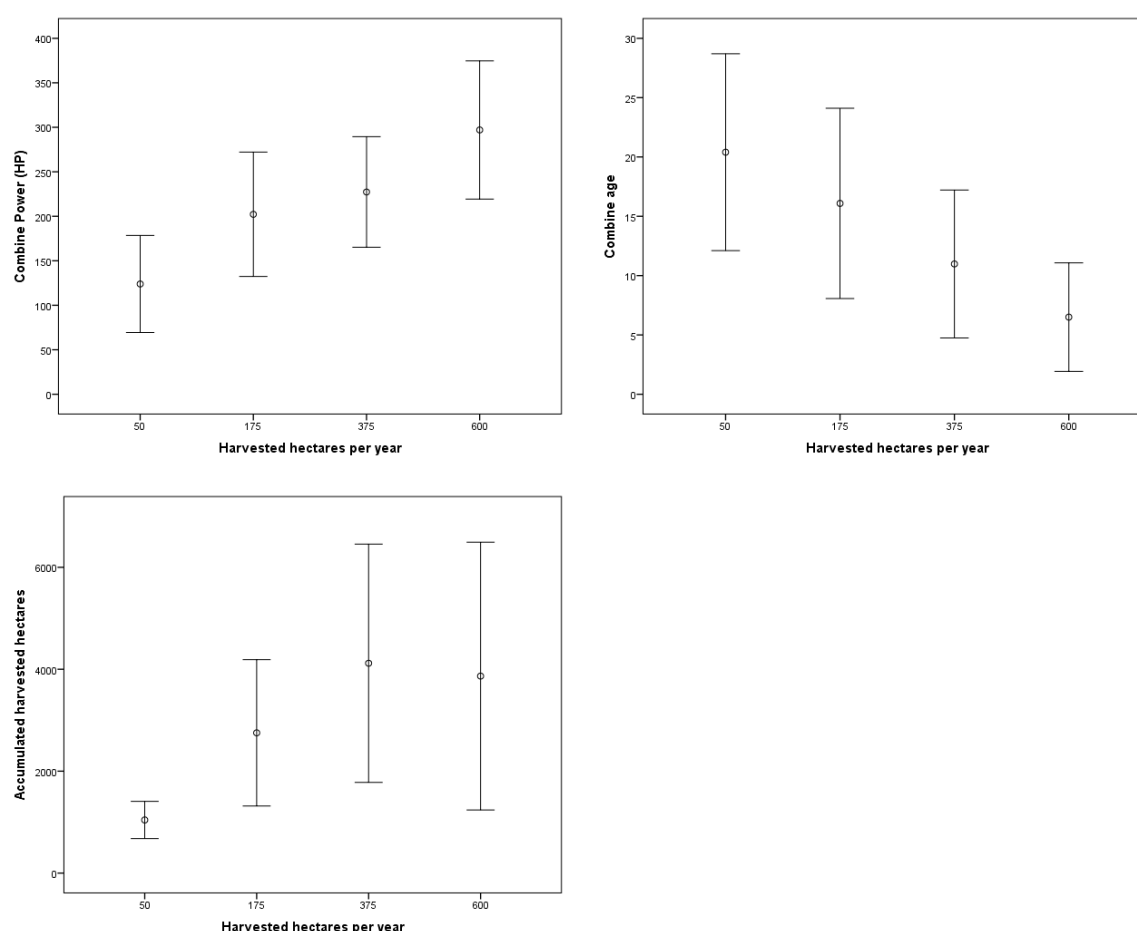


Figure 2. Relationship between the annual hectares, power, age and accumulated hectares variables considering the 221 harvesters included in the survey. Mean values \pm standard deviations are shown.

3.2. Relationship between Variables and Fire

From the contingency tables of each variable with respect to fire, it was observed that the age ($\chi^2 = 0.673$), power ($\chi^2 = 0.723$) and annual hectares ($\chi^2 = 0.766$) variables did not show a statistically significant relationship with fire. However, for the accumulated hectares variable a $\chi^2 = 0.055$ was obtained, very close to the level of significance (0.05). The contingency table showed very similar fire percentages for machines that had worked up to 6000 ha, but, once this threshold had been exceeded, the fire percentage would be high (60%).

Since the total accumulated hectares was the only variable that was related to fire risk, a more detailed analysis of possible relationships of this variable with the rest of the variables was carried out. No significant relationship was detected with the use of the straw chopper ($\chi^2 = 0.282$), but a

significant relationship was observed with the power variable ($\chi^2 = 0.012$), apart from the age ($\chi^2 = 0.000$) and annual hectares ($\chi^2 = 0.000$) variables of which it directly depended.

The relationships between the three variables, considering only the 74 harvesters for which fire cases were reported, are shown in Figure 3. The profile of machines with more than 6000 accumulated ha and that would present a greater probability of fire would correspond to machines with an average power of 286 HP, an average age of 15 years and which harvest an average of 548 ha/year.

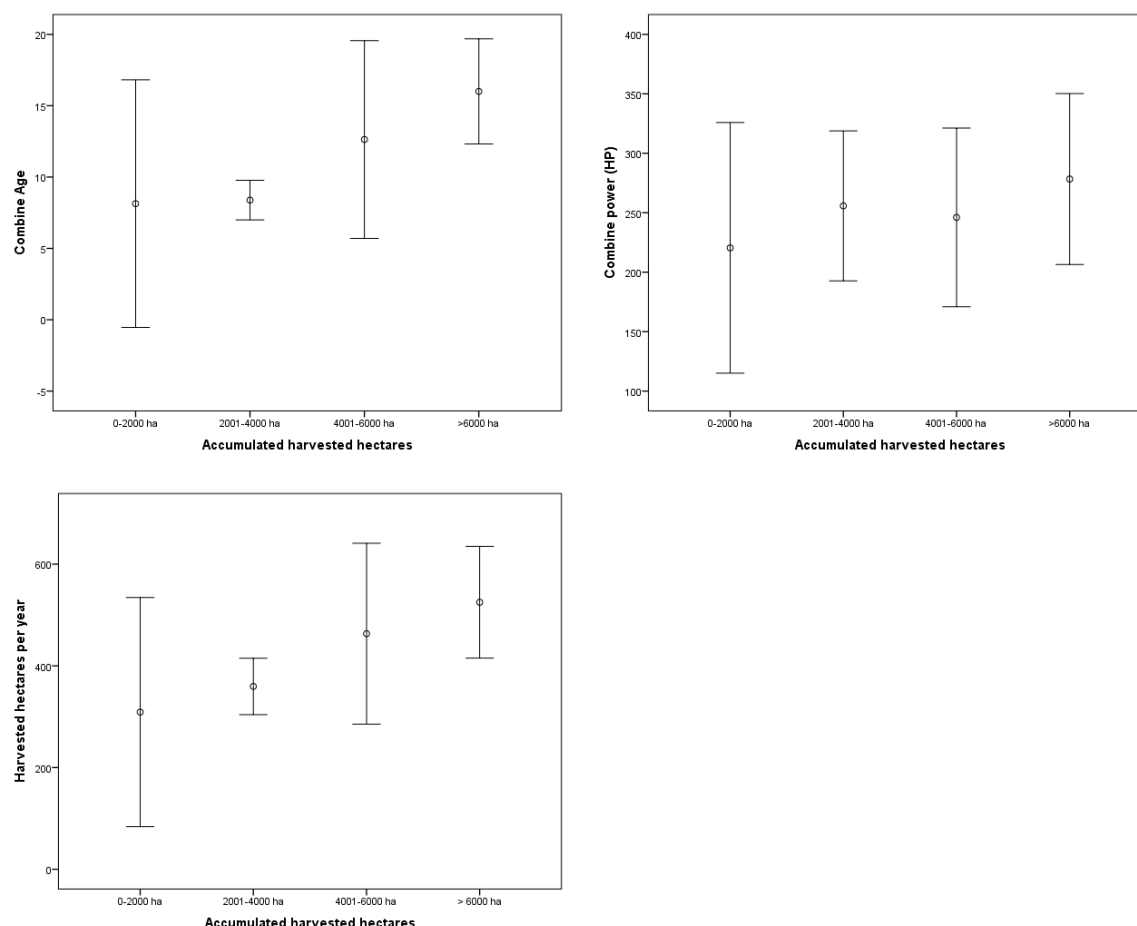


Figure 3. Relationship between the accumulated hectares and annual hectares, power and age considering only the 74 harvesters associated with fire cases. Average values \pm standard deviations are shown.

3.3. Determination of Fire Source Areas

Based on the contingency table in which the relationship between the area of origin of the fire and the use of the straw chopper was analyzed, a value of $\chi^2 = 0.159$ was obtained, so the use of the straw chopper did not favor the origin of the fire in any specific area of the machine.

In Table 3, the fire source areas are shown according to the data collected in the survey and from data provided by an insurance company (updated in 2017). In both cases, it could be observed that the area in which more fires originated was the engine (~32%). However, according to the insurer's data, the second most important cause of fire would be electric failures (26%), while in the survey this cause was estimated to account for 10% of the fires. According to the data collected in the survey, the second area in which more fires would originate would be the cutting bar (31%), which only accounted for 11% of the fires according to the insurer. Bearings, belts and other areas of the machine (brakes, alternator, straw chopper, etc.) presented similar percentages in the survey and in the insurer's database. If these data are compared with the literature [5,8-10], the results are coincident in

that the engine area would be the main cause of fire, and in that the bearings and belts would also be responsible for a significant percentage of the fires.

Table 3. Comparison of main areas of origin of fire in harvesters.

Zone	Survey	Insurance company	Quick [5]	Shutske <i>et al.</i> [8]	Shutske <i>et al.</i> [9]
Cutting bar	30.77%	11.11%	6.49%	-	3%
Electrical causes	8.79%	25.93%	12.99%	34%	14%
Engine	31.87%	33.33%	45.45%	40%	33%
Other areas	10.99%	7.41%	12.97%	8%	28%
Bearings and belts	17.58%	22.22%	22.10%	18%	22%

The identification of the points of the machine with the greatest risk of fire opens the way to implement measures to minimize this risk, such as continuous monitoring by means of temperature sensors that provide warnings in the machine cabin, in the same way that remote sensors are currently used to assess the susceptibility of forest masses and crops [12].

3.4. Thermal analysis. Hot Plate Auto-ignition Point of the Residues

Figure S1 shows the TG, DTG and DSC curves related to the wheat residue samples, in an inert atmosphere and in an oxidative atmosphere. In the TG curve, several stages of weight loss could be observed. The first stage, between room temperature and 150 °C, would be related to moisture removal. In the second stage (150–350 °C), depending on the atmosphere, up to 50% of the mass would be volatilized, and would correspond to oxidative pyrolysis and release of volatiles coming from the thermal decomposition of hemicellulose, cellulose and part of lignin. True combustion would take place above 350 °C, in which lignin residues and a mixture of carbonaceous solids (with a small mineral component) would undergo moderate combustion (smoldering) up to approximately 500 °C. At temperatures of 600 °C, weight losses of over 60% in N₂ atmosphere and of ca. 80% in O₂ atmosphere were registered. The weight loss maxima were sensitized on DTG curves with peaks at 72–72.8 °C, 300–307 °C and 456 °C, depending on operative conditions.

The DSC curve in O₂ atmosphere was characterized by the presence of two endotherms between 300 °C and 500 °C, corresponding to the hemicellulose and cellulose decomposition reactions, with maxima at 324 °C and 458 °C. The former corresponds to oxidative pyrolysis and the latter to combustion.

From the thermal analysis data, it could be inferred that the lowest temperature at which ignition could occur was 150 °C, and that a perfectly declared process would occur at 307 °C, with an associated heat of reaction close to 900 kJ/kg.

The results of the hot-plate auto-ignition tests are shown in Table 4. A decrease in ignition temperature was observed when the particle size of the residue was smaller, in agreement with the findings of Polin *et al.* [13] for sunflower dust field samples from combine harvesters. Similarly, for the same particle size, the ignition temperature decreased as the sample thickness increased. The minimum ignition temperature was 250 °C, associated with the 250 µm residue and a thickness of 15 mm. These results were in good agreement with those obtained by Fernandez-Anez *et al.* [6], who reported a value of 250 °C for a thickness of residue of 50 mm.

It must be taken into consideration that in combine harvesters the residue particles show a size distribution in which small sizes constitute a high percentage in weight. Polin *et al.* [14], working with sunflower residue, obtained a 78% of residue particles below 750 µm. In the study presented herein, 66% of the residue particles collected from the five combine harvesters were below 1 mm.

An univariate test of between-subjects effects was conducted for temperatures as a function of the exhaust gases treatment system considering the five technologies present in the machines tested (Table 2: EGR+DPF; EGR; SCR+EGR+DPF; SCR+EGR; untreated exhaust). According to Table S3, there were significant temperature differences ($F=1550.14$; $p=0.000$) depending on the exhaust gases treatment system. Results of Tukey's HSD test showed differences between all systems, with the highest mean temperatures in SCR+EGR and SCR+EGR+DPF systems (Table 5).

Table 4. Results of hot-plate auto-ignition tests of wheat residue layers according to UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016.

Thickness	Size	Surface temperature (°C)	Test result	Ignition time (min)
5 mm	<250 µm	290	Ignition	5
		280	No Ignition	30
		280	No Ignition	30
	250 µm	320	Ignition	3
		310	No Ignition	30
	500 µm	340	Ignition	3
		330	No Ignition	30
	1 mm	360	Ignition	2
10 mm	<250 µm	350	No Ignition	30
		280	Ignition	7
		270	Ignition	10
	250 µm	260	No Ignition	45
		300	Ignition	5
		290	Ignition	6
		280	No Ignition	45
	500 µm	320	Ignition	3
		310	Ignition	5
		300	Ignition	6
15 mm	<250 µm	290	No Ignition	45
		260	Ignition	13
		250	Ignition	28
	250 µm	240	No Ignition	120
		280	Ignition	11
		270	Ignition	12
		260	Ignition	17
	500 µm	250	No Ignition	60
		290	Ignition	10
		280	Ignition	12
		270	Ignition	16
		260	Ignition	20
		250	No Ignition	90

Table 5. Results from Tukey's HSD test for temperatures as a function of the exhaust gases treatment system.

Exhaust gases treatment system	N	Subset				
		1	2	3	4	5
EGR + DPF	1665	82.5238				
EGR (w/o filter)	1036	110.6356				
Untreated exhaust	3626	147.5165				
SCR + EGR + DPF	773	163.3424				
SCR + EGR (w/o filter)	2448	190.2254				
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on observed means. The error term is Mean Square(Error) = 2098.044. Tukey's HSD test uses Harmonic Mean Sample Size = 1410.917. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed. Alpha = 0.05.

3.5. On-site Monitoring of Harvesters

Temperature data collected in the nine machines monitored in field conditions is summarized in Table 6. It is worth noting that the highest temperatures were recorded in the exhaust manifold for all machines, with maximum temperatures above 200 °C in 5 of the machines and, in two cases (machines #1 and #4), with temperatures above 250 °C, which reached up to 305 °C in machine #1, showing an important risk of residue ignition. This would corroborate that the engine zone (exhaust manifold) would be a key zone, in which temperatures above the ignition temperature of the crop residue [6] can be reached.

Table 6. Temperatures recorded during the 2018 and 2019 campaigns in the nine harvesters monitored in field conditions. Maximum ambient temperatures and the associated relative humidity (RH) are also shown for comparison purposes.

Machine	Probe location	N	Combine harvester		Ambient conditions	
			T _{op} (°C)	T _{max} (°C)	T _{max} (°C)	RH (%)
Machine #1	Exhaust manifold	2448	190.2±42.3	305.4	42.2	29.9
	SCR	2448	97.3±19.2	142.1		
	Gearbox	2448	52.2±11.3	105.7		
	Engine transmission output	2448	69.1±11.4	89.1		
Machine #2	Particulate filter	1418	109.7±16.2	154.2	43.8	20.5
	Gearbox	1418	52.5±9.9	97.1		
	Engine block	1418	56.2±5.2	69.2		
	Engine transmission output	1418	81.1±8.6	95.1		
Machine #3	Exhaust manifold	608	118.2±27.3	159.9	42.6	22.6
	Engine block	1121	77.6±9.7	87.9		
	Engine transmission output	1121	69.4±11.7	87.7		
Machine #4	Exhaust manifold	968	216.7±42.5	289.9	44.8	15.8
	Engine block	968	72.5±6.2	82.3		
	Engine transmission output	968	55.8±7.6	70.4		
	Hydrostatic system output	968	54.9±7.4	69.5		
Machine #5	Exhaust manifold	963	155.8±21.2	222.7	44.9	16.4
	Engine block	963	78.3±8.5	93.1		
	Hydrostatic system output	963	51.4±5.9	67.8		
	Engine cylinder heads	963	70.2±4.5	78.8		
Machine #6	Exhaust manifold	1665	82.5±13.1	105.8	47.9	11.2
	Engine block	866	70.1±8.1	85.9		
	Engine transmission output	1665	60.3±8.7	80.4		
Machine #7	Exhaust manifold	1036	110.6±21.8	156.4	-	-
	Engine block	1036	71.4±7.7	87.7		
	Engine transmission output	1036	65.2±9.3	80.1		
Machine #8	Exhaust manifold	773	163.3±35.0	230.3	-	-
	Engine block	773	73.7±6.2	84.9		
	Engine transmission output	773	39.6±12.3	70.6		
Machine #9	Exhaust manifold	574	132.8±46.9	243.2	42.8	21.2
	Engine block	574	69.3±4.6	78.8		
	Engine transmission output	574	70.8±10.6	94.2		

T_{op} stands for operating temperature (average ± standard deviation) and T_{max} stands for maximum registered temperature. SCR stands for selective catalytic reduction.

It is important to keep in mind that the risk of fires originated in harvesting machines increases when the weather conditions are adverse [8]. Venem *et al.* [15] concluded that 48.5% of the fires coincided with the hours of highest temperatures (2:00 PM–4:00 PM). In Table 6 it may be observed that ambient temperatures reached extreme values coinciding with temperatures higher than 250 °C in the exhaust manifold of some machines, thus constituting high fire risk situations. Given that the annual number of high-temperature days (HTDs, viz. days with mean temperatures higher than 20, 22.5 and 25 °C) is increasing across southern Europe, as shown by Cardil *et al.* [16] for temperature data in the June–September period from 1978 to 2012 in the south of France, interior Spain and the northwestern Iberian Peninsula, the probability of such high fire risk situations is expected to continue increasing.

Considering an ignition temperature of the wheat residue of *ca.* 250 °C, machines #1 and #4 were analyzed in more detail, in order to determine the operating time in which this threshold was exceeded (in this case in the exhaust manifold). Figure 4 shows the temperatures registered during the test period in the exhaust manifold of machines #1 and #4.

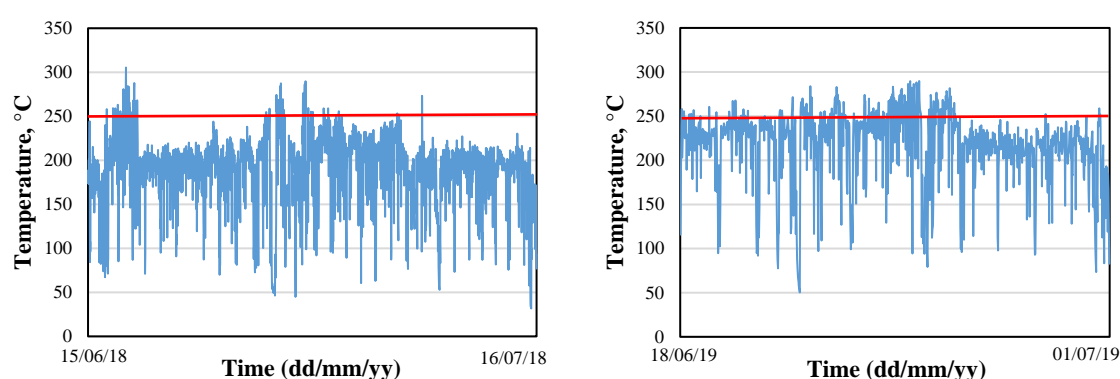


Figure 4. Temperature evolution in the exhaust manifold (blue) vs. straw ignition temperature (red). Left: Machine 1; Right: Machine 4. Periods in which the machines were not working (e.g., nights) are not shown.

In the case of machine #1, one can observe that this threshold (250 °C) was occasionally exceeded (specifically, 3.51% of the working time), while in machine #4 the threshold was exceeded during a 16.63% of the working time, thus generating a high risk of ignition of the residue and, consequently, of fire.

Figure 5 shows the histogram of the time periods in which the temperature exceeded 250 °C in machines #1 and #4. Although in most of the periods the duration was close to 10 minutes, a period of 100 consecutive minutes with temperatures above 250 °C was registered in machine #4, and a period of 70 minutes was recorded for machine #1. This fact, taking into consideration the ignition times of the crop residue (Table 4), reinforces the conclusion regarding the high fire risk at the exhaust manifold of machines #1 and #4.

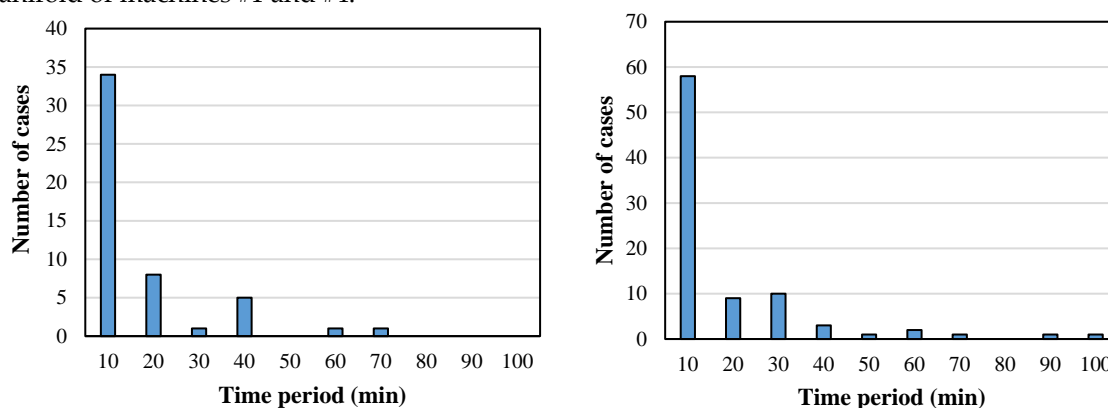


Figure 5. Histogram of time periods in which temperatures above 250 °C were reached in the exhaust manifold. Left: Machine #1; Right: Machine #4.

The tests carried out with the cutting bar, the second most important cause of fire according to data from the survey, made it possible to compare temperature evolution in a blade operating in normal conditions *vs.* a blade subjected to friction (Figure 6). It was observed that 10–15 minutes after the movement of the cutting blade had started, the friction blade had reached 428 °C (compared to a maximum temperature of 52 °C for a blade that operated in normal conditions). In the thermal image (Figure 6, *right*), the difference in temperature between the blade subjected to friction and the other blades working in normal conditions becomes apparent. A short video is provided in supporting information (video S1). Poor maintenance, in this case of the cutting bar, can result in abnormal temperatures and frictional spark generation, which in the presence of agricultural waste can easily cause a fire.

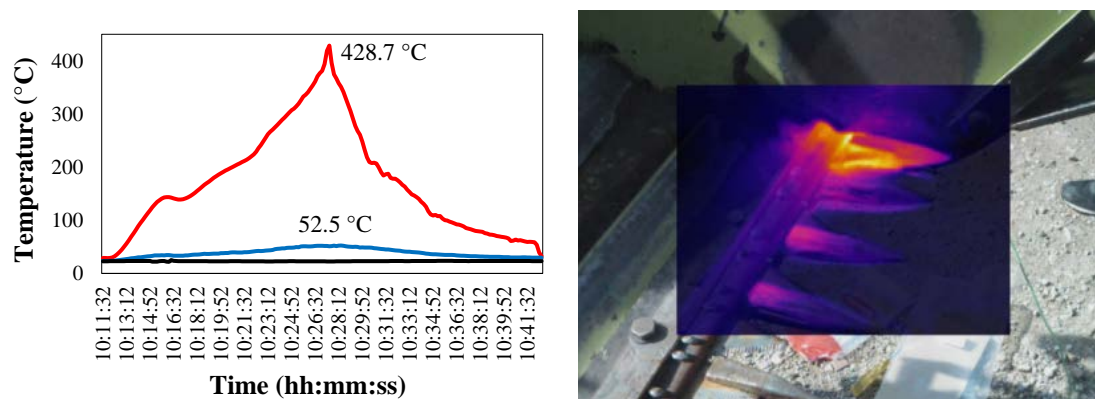


Figure 6. *Left:* Temperature evolution in the cutting bar for a blade in good conditions (blue) and for a blade subjected to friction (red). The ambient temperature is shown in black. *Right:* thermal image of blade subjected to friction.

4. Conclusions

From the statistical analysis of the survey data, with regard to the technical characteristics of the harvesters, only the total hectares harvested in the lifetime of the machine had a significant relationship with the fire risk, in such a way that the risk of fire would considerably increase over 6000 accumulated ha. In relation to the areas of highest risk within the harvester, 32% of the fires had their origin in the area of the engine, compared with 31% in the cutting bar and 18% in the bearings and belts. From the ignition point experiments conducted using wheat residue samples to describe conditions that could start fires in the harvesters, it was found that ignition temperatures would range from 250 to 340 °C, depending on the size and thickness of the wheat waste, in good agreement with thermal analysis (TG, DTG, DSC) results. In tests carried out *in situ* on nine harvesters, temperatures of up to 300 °C were detected in the engine area (exhaust manifold). Significant temperature differences on the exhaust manifold were found depending on the exhaust gases treatment system, with the highest mean temperatures for SCR+EGR and SCR+EGR+DPF systems. In the cutting bar, a blade working in friction conditions reached temperatures above 400 °C. These temperatures, together with the accumulation of crop residue, would be responsible for the origin of the fires.

Supplementary Materials: The following are available online at www.mdpi.com/xxx/s1, Table S1: Proximate analysis and elemental analysis results for the wheat residues; Table S2: Granulometric analysis results for the wheat residues from five combine harvesters used in the hot plate auto-ignition studies; Figure S1: DSC, TG and DTG curves for wheat residues in inert and oxidative conditions; Table S3: Tests of between-subjects effects (results from univariate analysis) for temperatures as a function of the exhaust gases treatment system.; Figure S2: Results from univariate analysis for temperatures as a function of the exhaust gases treatment system; Video S1: Temperature evolution in a cutting bar.

Author Contributions: Conceptualization, F.J.G.-R.; methodology, F.J.G.-R., P.M.-R., M.V.-C. and A.B.-G.; validation, F.J.G.-R. and M.V.-M.; formal analysis, J.P.V.-A., F.J.G.-R. and P.M.-R.; investigation, J.P.V.-A., M.V.-M., F.J.G.-R., P.M.-R., M.V.-C. and A.B.-G.; resources, F.J.G.-R.; writing—original draft preparation, J.P.V.-A.,

F.J.G.-R. and P.M.-R.; writing—review and editing, F.J.G.-R. and P.M.-R.; visualization, J.P.V.-A., F.J.G.-R. and P.M.-R.; supervision, F.J.G.-R. and P.M.-R.; project administration, F.J.G.-R.; funding acquisition, F.J.G.-R.

Funding: This research was funded by Gobierno de Aragón, under project “ICO: Análisis de riesgos de incendios en cosechadoras de cereales” (Order DRS/190/2017).

Acknowledgments: The Authors would like to acknowledge the use of Servicio General de Apoyo a la Investigación-SAI, Universidad de Zaragoza. The collaboration of ASAJA Huesca, AGPME-Itaga, AGRACON, ANSEMAT, Sociedad Cooperativa del Campo Santa Leticia, JACA-LARRAZ agricultural services, Berdún Canal agricultural services and COGASAL garage is also gratefully acknowledged.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

- Shah, V.; Twidwell, D.; Wonkka, C.L.; Sindelar, M.T.; Weir, J.R. First Approximations of Prescribed Fire Risks Relative to Other Management Techniques Used on Private Lands. *Plos One* **2015**, *10*.
- Vélez, R. *El reto de la prevención de los incendios forestales en un ambiente global*. In Proceedings of II Congreso Forestal Español; Dirección General de Conservación de la Naturaleza: Pamplona, Spain, pp 479-484.
- Biot, Y.; Rigolot, E. La necesidad de estrategias que se anticipen al cambio climático entre otros. In *Convivir con los incendios forestales: lo que nos revela la ciencia*, Biot, Y., Ed. European Forest Institute: Joensuu, Finland, 2009; pp 82-85.
- Bragachini, M.A.; Mendez, A.A.; Peiretti, J.; Santa Juliana, D.M.; Velez, J.P.; Sanchez, F.R.; Villarroel, D.D.; Scaramuzza, F.M.; Pognante, J.; Gallarino, A. *Incendios de cosechadoras y rastrojos en Argentina y su impacto económico, ambiental y social*; INTA: Argentina, 2013; p 15.
- Quick, G.R. *An investigation into combine harvester fires*; Grains Research and Development Corporation: Australia, 2010; p 20.
- Fernandez-Anez, N.; Garcia-Torrent, J. Influence of particle size and density on the hot surface ignition of solid fuel layers. *Fire Technol.* **2018**, *55*, 175-191.
- Cardil Forradellas, A.; Salis, M.; Spano, D.; Delogu, G.; Molina Terrén, D. Large wildland fires and extreme temperatures in Sardinia (Italy). *Iforest-Biogeoosciences Forestry* **2014**, *7*, 162-169.
- Shutske, J.; Field, W.E. *An Integrated Loss Control Strategy for Grain Combine Fires*. In Proceedings of 1988 International Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers; American Society of Agricultural Engineers: Chicago, IL, USA, p 17.
- Shutske, J.M.; Field, W.E.; Gaultney, L.D.; Parsons, S.D. Agricultural machinery fire losses: a preventative approach. *Appl. Eng. Agric.* **1990**, *6*, 575-581.
- White, B.; Giumelli, J. *RRR - Owner survey: Harvester fires*; Kondinin Group: Australia, 2006.
- Keskin, M.; Şekerli, Y.E. An evaluation of combine harvester accidents in turkey. *Journal of Agricultural Faculty of Mustafa Kemal University* **2018**, *23*, 137-147.
- de Leeuw, J.; Vrieling, A.; Shee, A.; Atzberger, C.; Hadgu, K.; Biradar, C.; Keah, H.; Turvey, C. The Potential and Uptake of Remote Sensing in Insurance: A Review. *Remote Sensing* **2014**, *6*, 10888-10912.
- Polin, J.P.; Gu, Z.; Humburg, D.; Dalsted, K. Sunflower dust properties that contribute to increased fire risk during harvest and biorefinery operations. *Ind. Crop. Prod.* **2013**, *50*, 227-231.
- Polin, J.P.; Gu, Z.; Humburg, D.S.; Dalsted, K.J. Source of airborne sunflower dust generated during combine harvester operation. *Biosys. Eng.* **2014**, *126*, 23-29.
- Venem, M.; Shutske, J. *Combine fire prevention and control summit*. In Proceedings of 2002 ASAE Annual Meeting / CIGR XVth World Congress; American Society of Agricultural and Biological Engineers: Chicago, IL, USA, p 028017.
- Cardil, A.; Molina, D.M.; Kobziar, L.N. Extreme temperature days and their potential impacts on southern Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2014**, *14*, 3005-3014.





**X Congreso Ibérico
de Agroingeniería**

**X Congresso Ibérico
de Agroengenharia**

Se certifica que el trabajo titulado

**Riesgos de incendio asociados a cosechadoras de cereales:
análisis de zonas críticas en la maquinaria**

Cuyos autores son

**Jesús Pedro Val-Aguasca; María Videgain-Marco; Pablo
Martín-Ramos; Mariano Vidal-Cortés; Antonio Boné-
Garasa; Francisco Javier García-Ramos**

Ha sido presentado en formato **ORAL** en el
X Congreso de Agroingeniería, celebrado en
la Escuela Politécnica Superior (Universidad Zaragoza),
Huesca (España), de 3 al 6 de septiembre de 2019.

Huesca, a 7 de septiembre de 2019

PRESIDENTE DEL COMITÉ ORGANIZADOR
F. JAVIER GARCÍA RAMOS

SECRETARIO DEL COMITÉ ORGANIZADOR
PABLO MARTÍN RAMOS



Escuela Politécnica
Superior - Huesca
Universidad Zaragoza



Secção Especializada de
Engenharia Rural - SCAP



Riesgos de incendio asociados a cosechadoras de cereales: análisis de zonas críticas en la maquinaria

Jesús P. Val-Aguasca^{1*}, María Videgain-Marco¹, Pablo Martín-Ramos¹, Mariano Vidal-Cortés², Antonio Boné-Garasa³, F. Javier García-Ramos¹

¹ Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca; 648857@unizar.es.

² Departamento de Ingeniería Mecánica, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca.

³ Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/n, 22071 Huesca.

Resumen: En Aragón, en los años 2016 y 2017, se han producido 295 y 464 incendios respectivamente, afectando a una superficie total de 915 y 908 ha. De dichos incendios, un 12% de los ocurridos en 2016 y un 7% de los que tuvieron lugar en 2017 fueron debidos a motores y máquinas, mayormente producidos por cosechadoras. El propósito de este trabajo ha sido investigar las zonas críticas de las cosechadoras asociadas al riesgo de incendio a través de la realización de una encuesta dirigida a propietarios de cosechadoras en Aragón. Se ha recabado información tanto sobre características técnicas de las máquinas (marca, potencia, antigüedad de la máquina, hectáreas cosechadas, etc.) como, en su caso, de las características de los incendios producidos (cultivo cosechado, utilización de sistema de picado, zona de la máquina donde se originó el incendio, etc.). En las 275 respuestas obtenidas se han referido 75 casos de incendio. En base a los datos facilitados en la encuesta, se ha analizado si existe alguna relación entre las características de la máquina y la producción de un incendio, y se han comparado las zonas de la cosechadora en la que se ha originado el incendio con información facilitada por una compañía de seguros. Se ha podido concluir que sólo existe una relación estadísticamente significativa de los incendios con el número de hectáreas cosechadas (vida útil de la cosechadora), siendo especialmente alto el riesgo para máquinas con más de 6000 ha acumuladas. Por otra parte, un 32% de los incendios tuvieron su origen en la zona del motor, frente a un 31% en la barra de corte y un 18% en los rodamientos y correas. El uso del picador no favoreció el origen del incendio en ninguna zona concreta de la máquina. El estudio se ha completado con medidas de temperatura *in situ* realizadas sobre varias máquinas en el verano de 2018, registrándose temperaturas superiores a 300 °C en el colector de escape, y superiores a 400 °C en la barra de corte cuando la cuchilla trabajaba en condiciones de rozamiento.

Palabras clave: barra de corte, encuesta, maquinaria agrícola motor, temperatura de combustión

1. Introducción

Los incendios constituyen una amenaza grave tanto por la destrucción de patrimonio medioambiental como de cultivos forestales, bienes materiales y vidas humanas. Las pérdidas agrícolas por incendios no se limitan, a corto plazo, a la destrucción de las cosechas, sino que, a medio plazo, se incrementan con pérdidas de la capacidad productiva estimadas entre un 35-45% de la producción en los años posteriores [1].

En España, las causas que originan los incendios son de distinta índole. A través de los boletines informativos mensuales publicados por el MAPA, se ha analizado la causalidad de los incendios en Aragón. Los incendios forestales se clasifican en 5 grupos en función de la causalidad: negligencia y accidente, intencionado, natural (rayo), desconocido y reproducción del incendio. En Aragón, en los años 2016 y 2017, se han producido 295 y 464 incendios forestales respectivamente, afectando a una superficie total de 915 y 908 ha. La causa más importante de estos incendios, aparte de la negligencia, ha sido la ignición de motores y máquinas agrícolas (incluidas cosechadoras), con un 12% de los incendios ocurridos en 2016 y un 7% de los que tuvieron lugar en 2017. A este respecto, es preciso destacar el incendio en el municipio de Luna (Zaragoza) de 2015, causado por una cosechadora, que afectó a un total de 13889 ha.

Las posibles causas de generación de incendios en las máquinas agrícolas y concretamente en las cosechadoras son muy variadas. Quick [2] enumera una serie de zonas potenciales para la generación del incendio: motor y conductos de salidas de gases de combustión, transmisiones, cojinetes, frenos, cortocircuitos eléctricos, impacto de los cabezales de siega con piedras u otros elementos e introducción de objetos extraños en la máquina. De todas ellas, la causa más común es la acumulación de material combustible en las zonas con altas temperaturas situadas cerca del motor. Las temperaturas en la superficie de estos elementos pueden alcanzar los 500 °C [2], mientras que las temperaturas de ignición de los residuos de cultivo varían en función del espesor de la muestra, situándose por encima de 200 °C para la paja de trigo [3]. En cuanto a la propagación del incendio, las condiciones de campo pueden favorecer o dificultar el proceso, existiendo 4 factores que condicionan dicha propagación: humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad del viento y tipo y condición de cultivo [2,4].

Pese a la importancia de las consecuencias de los incendios agrícolas y forestales, apenas existen estudios centrados en las causas de los incendios en cosechadoras de cereales. Hasta ahora, los estudios más importantes han sido los realizados en Estados Unidos por el grupo de Shutske [5,6], en los que se investigaron más de 4000 incendios en cosechadoras y tractores, pudiendo acceder en 265 casos a la máquina incendiada para realizar sobre ella un estudio detallado. En base a los datos obtenidos, los autores concluyeron que el 74% de los incendios se originaron en la zona del motor por diferentes causas (calentamiento de superficies, salida de gases de combustión y componentes eléctricos). También se concluyó que el material que inició el incendio generalmente fueron los residuos del cultivo recolectado, seguidos por restos de combustible y aceite.

En Australia, otro estudio realizado por el grupo Kondinin [7] a 1170 agricultores informó de que aproximadamente el 25% de los encuestados habían experimentado un incendio en sus cosechadoras. Según los datos facilitados por los agricultores, la principal causa de incendio fue la acumulación de polvo y restos de cosecha en las superficies calientes de la máquina (33% de los casos) seguida por el calentamiento de los cojinetes (22%). También se concluyó que un mantenimiento y limpieza regular de la máquina era clave para la reducción del riesgo de incendio. En otro estudio llevado a cabo también en Australia, Quick [2] analizó 77 casos de incendios en cosechadoras, estimando que el 45% de los incendios se originaron en la zona del motor, seguidos por cojinetes y transmisiones con un 22%. Asimismo, concluye que la acumulación de cargas electrostáticas es una causa importante para el origen del incendio, remarcando la importancia del mantenimiento y la vigilancia del equipo para evitar los incendios.

Ante la ausencia de datos en España, con el presente trabajo se pretende obtener información sobre los riesgos de incendio en cosechadoras en Aragón, a fin de caracterizar el perfil de aquellas máquinas que más riesgo de incendio presentan. Para ello se ha llevado a cabo una encuesta a propietarios de cosechadoras y se han monitorizado en continuo varias máquinas durante toda la campaña de cosecha de verano del año 2018 con objeto de obtener la información de la temperatura en diferentes partes de la máquina.

2. Material y métodos

2.1. Encuesta

Se ha realizado una encuesta entre propietarios de cosechadoras en Aragón dirigida a la identificación de puntos críticos de la maquinaria, además de poder caracterizar el perfil de las máquinas con mayor riesgo de incendio. La encuesta ha sido estructurada en dos bloques: el primero referido a las características técnicas de la máquina (marca, potencia, antigüedad de la máquina, hectáreas cosechadas, etc.) y el segundo a las características del incendio en la cosechadora (cultivo cosechado, zona de la máquina donde se originó el incendio, etc.). En el siguiente enlace se puede visualizar la encuesta completa: <http://bit.ly/encuestacosechadoras>.

Posteriormente se ha realizado un análisis estadístico de los datos con el software SPSS v.18 (IBM, Chicago, IL, EE.UU.).

El análisis ha constado de tres partes: en primer lugar, se analizó la relación entre las variables potencia, antigüedad y hectáreas anuales cosechadas, creando además una nueva variable “hectáreas acumuladas”, que representa el número de hectáreas cosechadas hasta el momento del incendio (es decir, $\text{has anuales} \times \text{antigüedad}$) y hace referencia al desgaste o uso de la máquina en el momento del incendio. En una segunda etapa, se estudió la relación de las variables anteriormente comentadas con el riesgo de incendio, utilizando tablas de contingencia. Para ello se crearon variables categóricas para las hectáreas acumuladas (0-2000 ha, 2001-4000 ha, 4001-6000 ha y >6000 ha) y para la antigüedad de la máquina (0-10 años, 11-20 años y >20 años). En la tercera parte, se investigaron las zonas de origen de los incendios.

2.2. Monitorización de cosechadoras en campo

A lo largo de la campaña de cosecha 2018, se monitorizaron tres máquinas, instalando sondas de temperatura (termopares tipo K) en diferentes zonas de cada máquina, además de una sonda de temperatura/humedad ambiental (HOBO Pro v2) en el exterior (en las antenas exteriores de las cabinas). Dos de las máquinas seleccionadas (máquina 1 y máquina 2) fueron máquinas de 435 CV; nuevas o con poco tiempo de uso (estrenadas en las campañas 2018 y 2017, respectivamente); pertenecientes a empresas de servicio; que cosechan grandes superficies (>500 ha/año); y con anchuras de corte de 7,70 m. La máquina 1 cuenta con un escape de gases equipado con sistema de adición de urea y sistema de refrigeración “*Dynamic Cooling*”, mientras que la máquina 2 presenta un escape de gases equipado con filtro de partículas y sistema de refrigeración con ventilación lateral. La máquina 3, de un particular, presentaba las siguientes características: potencia de 160 CV, 3200 horas de trabajo acumuladas, 200 ha/año cosechadas, y anchura de corte de 5,10 m.

Los termopares se distribuyeron del siguiente modo: caja de cambios, filtro de urea, colector de escape y salida de la transmisión del motor en la máquina 1; caja de cambios, filtro de partículas, bloque motor y salida de la transmisión del motor en la máquina 2; y bloque motor, tubo de escape y salida de la transmisión del motor en la máquina 3. Todas las sondas se programaron de forma sincronizada para que recogieran datos cada 10 minutos durante las 24 h del día. Se han obtenido datos en continuo desde el 15/06/2018 hasta el 16/07/2018. La Figura 1 muestra el *datalogger* y las sondas utilizadas.

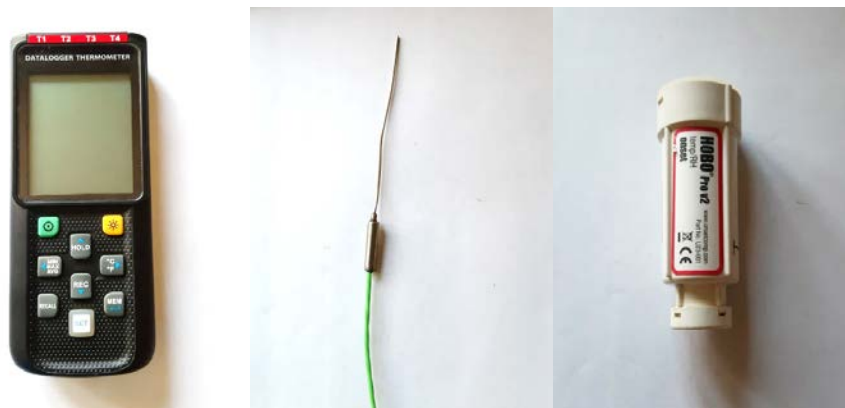


Figura 1. De izquierda a derecha: datalogger con cuatro canales de entrada, sonda de temperatura (termopar con cable apantallado) y sonda de temperatura/humedad ambiental.

Adicionalmente, se realizó una prueba con una barra de corte de cosechadora en mal estado y con muy poco mantenimiento, con el corte funcionando y la máquina estacionada. Para ello se colocaron tres termopares diferentes zonas de la barra de corte (en una cuchilla con rozamiento, en una cuchilla normal y en una chapa del corte) para la monitorización de la evolución de la temperatura. Las medidas fueron complementadas con las obtenidas con una cámara termográfica Fluke Ti200. En la Figura 2 se muestra una de las sondas colocadas en la barra de corte.

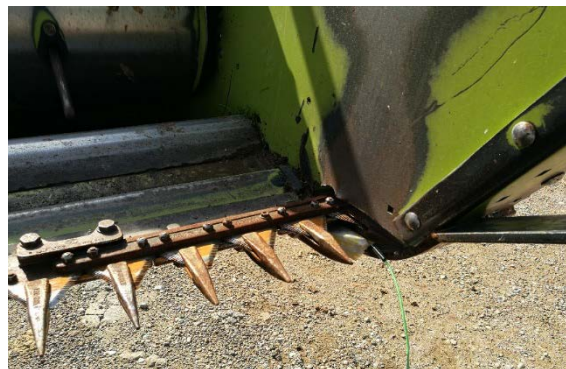


Figura 2. Sonda de temperatura instalada en barra de corte

3. Resultados y discusión

3.1. Relaciones entre variables

En la Figura 3 se muestra la relación entre las variables hectáreas anuales, potencia, antigüedad y hectáreas acumuladas, partiendo de la hipótesis de que las máquinas que más hectáreas cosechan al año estarán más expuestas y podrían tener más probabilidades de producir un incendio. Se observa que las máquinas que más hectáreas trabajan al año presentan unos mayores niveles de potencia, una menor antigüedad y un mayor número de hectáreas totales acumuladas (mayor desgaste).

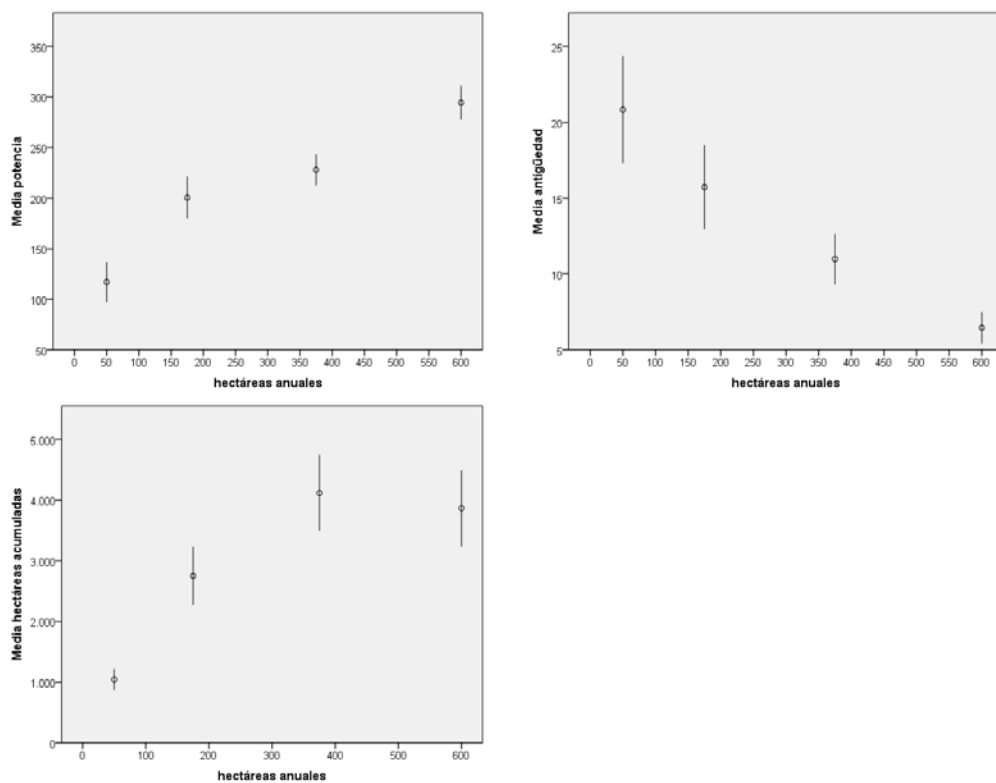


Figura 3. Relación entre las variables hectáreas anuales, potencia, antigüedad y hectáreas acumuladas. Se muestran los valores medios y las desviaciones estándar.

3.2. Relación entre variables e incendio

A partir de las tablas de contingencia de cada variable con respecto al incendio, se obtuvo que la antigüedad ($\chi^2=0,673$), la potencia ($\chi^2=0,723$) y las hectáreas anuales ($\chi^2=0,766$) no mostraron una relación estadísticamente significativa con los incendios. Ahora bien, para la variable hectáreas acumuladas se obtuvo un $\chi^2=0,055$, muy próximo al nivel de significación (0,05). En la tabla de contingencia se observan porcentajes de incendio muy similares para las máquinas que han trabajado hasta 6000 ha, pero, una vez superado este umbral, el porcentaje de incendio sería elevado (60%).

Al ser las hectáreas totales acumuladas la única variable que guarda relación con el riesgo de incendio se procedió a un análisis más detallado de posibles relaciones de esta variable con el resto de las variables. No se detectó una relación significativa con el uso de picador ($\chi^2=0,282$), pero sí con la variable potencia ($\chi^2=0,012$), aparte de con las variables antigüedad ($\chi^2=0,000$) y hectáreas anuales ($\chi^2=0,000$) de las que depende. En la Figura 4 se muestran las relaciones entre las tres variables. El perfil de las máquinas con más de 6000 ha acumuladas y que presentarían una mayor probabilidad de incendio correspondería a máquinas con una potencia media de 254 CV, una antigüedad media de 17 años y que trabajan una media de 492 ha/año.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA
3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

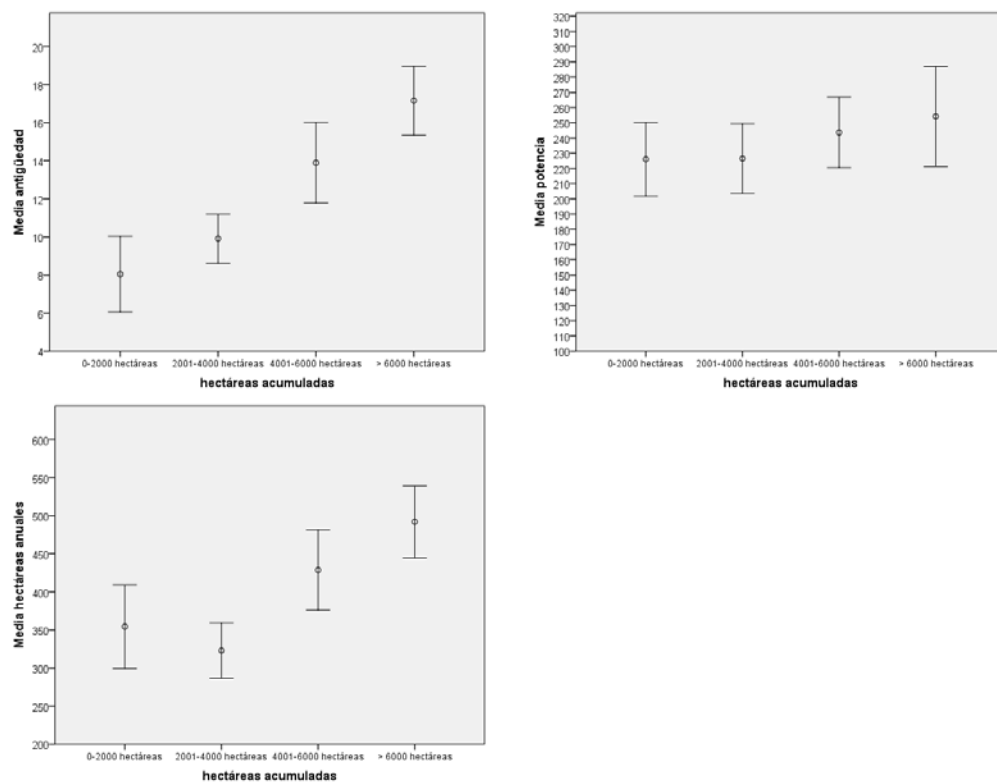


Figura 4. Relación entre las variables hectáreas acumuladas y hectáreas anuales, potencia y antigüedad. Se muestran valores medios y desviaciones estándar.

3.3. Determinación de las zonas de origen de incendios

En base a la tabla de contingencia en que se analizó la relación entre la zona de origen del incendio y el uso del picador, se obtuvo un valor de $\chi^2=0,159$, por lo que el uso del picador no favoreció al origen del incendio en ninguna zona concreta de la máquina.

En la Tabla 1 se muestran las zonas de origen de incendio según los datos de la encuesta realizada en este estudio, y los facilitados por una compañía de seguros (actualizados a 2017). En ambos casos se observa que la zona donde más incendios se originan es en la zona del motor (~32%). No obstante, según los datos de la aseguradora, la segunda causa más importante de incendio serían las eléctricas (26%), frente al 10% estimado a partir de la encuesta. Según los datos recopilados en la encuesta, la segunda zona donde más incendios se han originado sería la barra de corte (31%), que sólo representa un 11% de los incendios según la aseguradora. Rodamientos, correas y otras zonas de la máquina (frenos, alternador, picador, etc.) presentaron porcentajes similares en la encuesta y en la base de datos de la aseguradora. Si se comparan estos datos con la bibliografía [2,5-7], los resultados son coincidentes en cuanto a que la zona del motor es la mayor causa de incendio, y en que los rodamientos y correas también representan un porcentaje importante de los incendios.

Tabla 1. Comparativa de zonas de origen de incendio en cosechadoras.

Zona	Encuesta	Compañía aseguradora	Quick [2]	Shutske, et al. [5],[6]	Shutske, et al. [5],[6]
Barra de corte	30,77%	11,11%	6,49%	-	3%
Causas eléctricas	8,79%	25,93%	12,99%	34%	14%
Zona del motor	31,87%	33,33%	45,45%	40%	33%
Otras zonas	10,99%	7,41%	12,97%	8%	28%
Rodamientos y correas	17,58%	22,22%	22,10%	18%	22%

3.4. Monitorización in situ de cosechadoras

En la Tabla 2 se muestran datos de las temperaturas registradas en las tres máquinas monitorizadas en campo. Es destacable que, para la máquina 1, se alcanzan temperaturas medias próximas a 200 °C en el colector de escape, que puntualmente alcanzaron los 305 °C. En la máquina 2 y la máquina 3 se alcanzaron temperaturas máximas de 154 °C y 159 °C en el filtro de partículas y en el tubo de escape, respectivamente. Esto corrobora que la zona del motor (colector de escape) sería una zona clave, en la que se pueden alcanzar temperaturas superiores a la temperatura de ignición del residuo del cultivo [3].

Tabla 2. Temperaturas registradas durante la campaña 2018 (15/06/2018-16/07/2018) en las tres cosechadoras monitorizadas en campo.

Máquina	Zonas	N	T _{máx} (°C)	T _{media} (°C)	Desviación típica
Máquina 1	Caja de cambios	2448	105,7	52,2	11,3
	Colector de escape	2448	305,4	190,2	42,3
	Filtro de urea	2448	142,1	97,3	19,2
	Salida transmisión del motor	2448	89,1	69,1	11,4
Máquina 2	Caja de cambios	1418	97,1	52,5	9,9
	Bloque motor	1418	69,2	56,2	5,2
	Filtro de partículas	1418	154,2	109,7	16,2
	Salida transmisión del motor	1418	95,1	81,1	8,6
Máquina 3	Salida transmisión del motor	1121	87,7	69,4	11,7
	Bloque motor	1121	87,9	77,6	9,7
	Tubo de escape	608	159,9	118,2	27,3

En la Figura 5 se observa la evolución de la temperatura del colector de escape de la máquina 1 frente a la temperatura de ignición de la paja. Esta temperatura dependerá del espesor de la muestra, así como de su granulometría, correspondiendo un valor de 250 °C a un espesor de 50 mm [3]. Se puede apreciar que dicho umbral se supera de forma puntual (concretamente, un 3.51% del tiempo de trabajo), generando un elevado riesgo de ignición del residuo y, por consiguiente, de incendio.

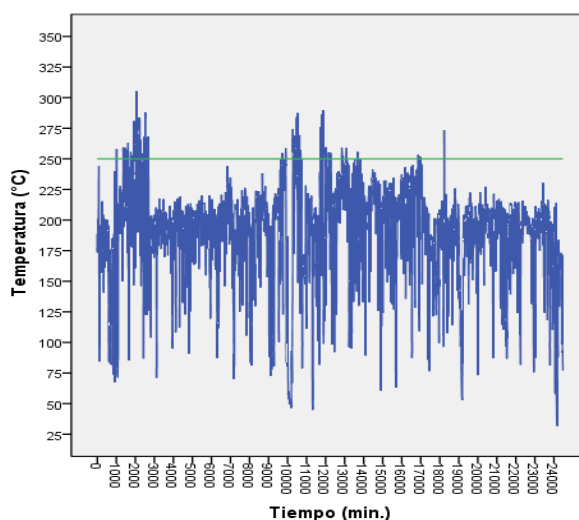


Figura 5. Evolución de la temperatura del colector de escape de la máquina 1 (azul) vs. temperatura de ignición (verde) [3].

Los ensayos realizados para barra de corte, segunda causa de incendio más importante según datos de la encuesta realizada, han permitido comparar (Figura 5) la evolución de temperatura para una cuchilla funcionando en condiciones normales y una cuchilla en rozamiento. Se observa que a los 10-15 min de iniciar el movimiento del corte, la cuchilla en rozamiento alcanza los 428 °C, frente a los 52 °C de temperatura máxima que se alcanzan en la cuchilla funcionando en condiciones normales. En la Figura 5, se muestra también una imagen de la cámara térmica, en la que aprecia claramente la diferencia de temperaturas entre la cuchilla con rozamiento y las demás cuchillas trabajando en condiciones normales. Un mal mantenimiento, en este caso de la barra de corte, hace que se alcancen temperaturas anormales, además de la posibilidad de generar chispas, que en presencia de residuo agrícola puede originar fácilmente un incendio.

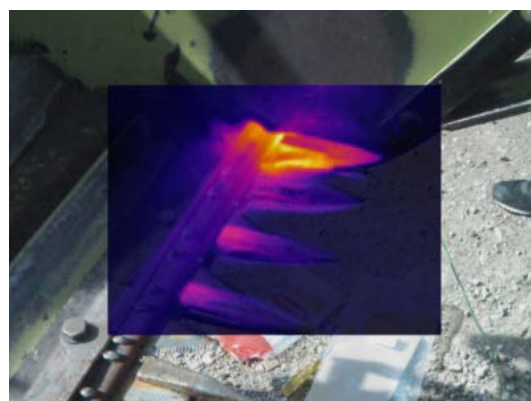
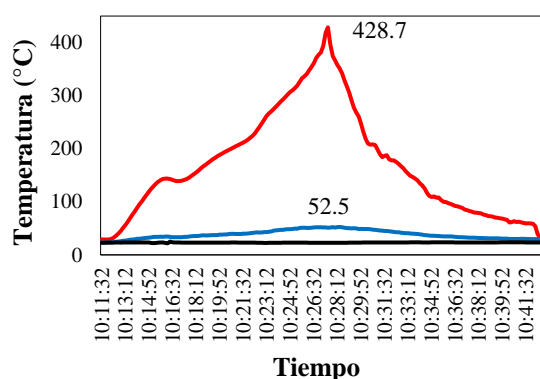


Figura 6. Izquierda: Evolución de la temperatura en barra de corte para una cuchilla en buen estado (azul) y para una cuchilla en rozamiento (rojo). La temperatura ambiente se muestra en color negro. Derecha: imagen termográfica de cuchilla en rozamiento.

Finalmente, en relación con los rodamientos, correas y otras zonas de la máquina, en la Figura 6 se muestra un rodamiento de cosechadora, pudiéndose apreciar fácilmente que le faltan algunas bolas. Estas bolas, a una elevada temperatura, pueden alcanzar la superficie del cultivo, siendo otro posible origen de incendios. Al igual que en la barra de corte, un adecuado mantenimiento sería fundamental para evitarlo.



Figura 7. Rodamiento desgastado de una cosechadora.

4. Conclusiones

Con respecto a las características técnicas de la máquina, sólo las hectáreas acumuladas (hectáreas totales cosechadas en la vida útil) presentan relación estadísticamente significativa con los incendios, siendo a partir de las 6000 ha acumuladas cuando el riesgo de incendio aumenta considerablemente. El perfil de máquinas con mayor riesgo, en base a los datos de la encuesta, correspondería a máquinas con más de 6000 ha acumuladas, potencia media de 254 CV, antigüedad de 17 años y 492 ha trabajadas al año. En cuanto a las zonas de mayor riesgo dentro de la cosechadora, un 32% de los incendios tuvieron su origen en la zona del motor, frente a un 31% en la barra de corte y un 18% en los rodamientos y correas. El uso del picador no tendría una influencia significativa. En pruebas realizadas *in situ* sobre las tres zonas clave mencionadas, se han detectado temperaturas de hasta 300 °C en la zona del motor, más concretamente en el colector de escape. En la barra de corte, una cuchilla trabajando en condiciones de rozamiento alcanzó temperaturas superiores a los 400 °C. Dichas temperaturas, junto con la acumulación de residuo agrícola, serían las responsables del origen de los incendios. Se pone, pues, de manifiesto que el mantenimiento de la maquinaria (barra de corte, rodamientos, etc.) sería uno de los factores clave para reducir el riesgo de incendios originados por máquinas cosechadoras de cereal.

Agradecimientos

Los autores agradecen su colaboración en este trabajo a ASAJA Huesca, AGPME-ITAGA, AGRACON, ANSEMAT, Sociedad Cooperativa del Campo Santa Leticia, servicios agrícolas JACA-LARRAZ, servicios agrícolas CANAL DE BERDÚN y al taller COGASAL.

Referencias

1. Bragachini, M.A.; Mendez, A.A.; Peiretti, J.; Santa Juliana, D.M.; Velez, J.P.; Sanchez, F.R.; Villarroel, D.D.; Scaramuzza, F.M.; Pognante, J.; Gallarino, A. *Incendios de cosechadoras y rastrojos en Argentina y su impacto económico, ambiental y social*; INTA: Argentina, 2013; p 15.
2. Quick, G.R. *An investigation into combine harvester fires*; Grains Research and Development Corporation: Australia, 2010; p 20.
3. Fernandez-Anez, N.; Garcia-Torrent, J. Influence of particle size and density on the hot surface ignition of solid fuel layers. *Fire Technol.* **2018**, *55*, 175-191.
4. Cardil Forradellas, A.; Salis, M.; Spano, D.; Delogu, G.; Molina Terrén, D. Large wildland fires and extreme temperatures in Sardinia (Italy). *Iforest-Biogeosciences Forestry* **2014**, *7*, 162-169.
5. Shutske, J.; Field, W.E. In *An Integrated Loss Control Strategy for Grain Combine Fires*, 1988 International Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, IL, USA, 1988; American Society of Agricultural Engineers: Chicago, IL, USA, p 17.
6. Shutske, J.M.; Field, W.E.; Gaultney, L.D.; Parsons, S.D. Agricultural machinery fire losses: a preventative approach. *Appl. Eng. Agric.* **1990**, *6*, 575-581.
7. White, B.; Giumelli, J. *RRR - Owner survey: Harvester fires*; Kondinin Group: Australia, 2006.